

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Změna mechanických vlastností svaru válcového
běhounu v závislosti na svařovacích parametrech**

**Change of Mechanical Properties of the Weld of
Cylindrical Tread Depending on the Welding
Parameters**

Student:

Bc. Vojtěch Pop

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Pop**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Změna mechanických vlastností svaru válcového běhounu v závislosti na svařovacích parametrech**
Change of Mechanical Properties of the Weld of Cylindrical Tread Depending on the Welding Parameters
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii metod svařování a možnosti použití konstrukčních ocelí pro výrobu běhounu vibračního válce.
2. Výroba zkušebních svarových spojů dle programu a kontrola parametrů svařování.
3. Zkoušení mechanických vlastností a metalografické hodnocení zhotovených svarových spojů.
4. Vyhodnocení vlivu změny parametrů svařování na mechanické vlastnosti svarových spojů.
5. Diskuze dosažených výsledků a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, Ostrava, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba, technická příprava výroby a kontrola svarových spojů*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, 2002, 417 s. ISBN 80-85771-97-1.
KUČERA, J. *Teorie svařování*, VŠB Ostrava 1991.
PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu II.*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Ondřej Sovák

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry

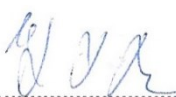


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20.5 2019


.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona)
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5 2019

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Vojtěch Pop

Adresa trvalého pobytu autora práce: Svinná 5,
Skuhrov nad Bělou, 51703



Podpis autora práce

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Lucii Krejčí za rady při vedení mé diplomové práce a dále Ing. Ondrovi Sovákovi za konzultace a pomoc při praktické části.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

POP, V. *Změna mechanických vlastností svaru válcového běhounu v závislosti na svařovacích parametrech: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2019, 65 s. Vedoucí práce: Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá metodou svařování pod tavidlem při rozdílných svařovacích parametrech. Svařované válcové běhouny se vyrábějí ve firmě Ammann, která vlastní svařovací zdroj umožňující svařovat stejnosměrným i střídavým proudem. V teoretické části je vypracovaná problematika elektrického oblouku a svařovacích parametrů, dále jsou zmíněny základní konvenční metody obloukového svařování a rozsáhlejší část patří problematice svařování pod tavidlem. Cílem práce je vyhodnocení svařených vzorků pomocí mechanických zkoušek a následné vyhodnocení zda lze výrobu zefektivnit nebo zlepšit pomocí jiných svařovacích parametrů kvalitu svarového spoje.

Klíčová slova: svařování, proud, tavidlo, parametr, materiál

ANNOTATION OF MASTERR THESIS

POP, V. *Change of Mechanical Properties of the Weld of Cylindrical Tread Depending on the Welding Parameters: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2019, 65 p. Thesis Head: Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.

The thesis deals with the method of submerged arc welding with different welding parameters. Welded cylindrical treads are manufactured by Ammann Company, which owns a power source that allows direct and alternating current welding. In the theoretical part, problems of electric arc and welding parameters are elaborated, subsequently the basic conventional methods of arc welding are mentioned and the larger part is dedicated to the submerged arc welding. The aim of the thesis is to evaluate welded samples by means of mechanical tests and to evaluate whether the production can be made more efficient or if the quality of welded joint can be improved when using other welding parameters.

Key words: welding, current, flux, parameter, material

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	8
ÚVOD	9
1 ELEKTRICKÝ OBLOUK.....	11
1.1 ZAPÁLENÍ OBLOUKU	12
1.2 SLOUPEC OBLOUKU	12
1.3 ELEKTRICKÝ OBLOUK V OBVODU STŘÍDAVÉHO PROUDU	15
1.3.1 Využití střídavého proudu při svařování metodou SAW	16
1.4 PŘENOS MATERIÁLU ELEKTRICKÝM OBLOUKEM	18
2 METODY SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM	19
2.1 MIG/MAG	20
3 SVAŘOVÁNÍ POD TAVIDLEM	22
3.1 SVAŘOVACÍ PARAMETRY	24
3.2 PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY	27
3.3 VARIANTY SVAŘOVÁNÍ POD TAVIDLEM	29
3.3.1 Zvyšování výkonu svařování pod tavidlem	32
3.3.2 Svařování do úzkého úkosu	32
4 PRAKTICKÁ ČÁST.....	33
4.1 ZÁKLADNÍ MATERIÁL OCEL S355J4	33
4.2 CHARAKTERISTIKA PŘÍDAVNÝCH MATERIÁLŮ	35
4.3 TECHNOLOGIE VÝROBY VÁLCOVÉHO BĚHOUNU	37
4.4 PŘÍPRAVA SVAROVÝCH PLOCH.....	40
4.5 SVAŘOVÁNÍ VZORKŮ	41
4.5.1 Výpočet vneseného tepla	43
4.6 ZKOUŠKA TAHEM	44
4.7 ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU.....	45
4.8 ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE VICKERSE	49
4.9 METALOGRAFICKÉ ŠETŘENÍ.....	51
4.10 SHRnutí VÝSLEDKŮ	64
5 ZÁVĚR	65
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
SEZNAM PŘÍLOH	68

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Popis
η	-	Účinnost
Q	J*mm ⁻¹	Vnesené teplo
U	V	Napětí
I	A	Proud
v _s	cm*min ⁻¹	Svařovací rychlost
DC		Stejnoseměrný proud
AC		Střídavý proud

ÚVOD

Historii svařování pod tavidlem spolu s ostatními metodami obloukového svařování můžeme zařadit již do 18. století, kdy byl pány Humphrym Davymem a Vasilijem Petrovem objeven elektrický oblouk. Při následných optimalizacích procesů bylo zapotřebí zabránit přístupu vzduchu ke svařovacímu ději. V roce 1929 Boris A. Robinoff obdržel patent pro automatizované svařování s použitím tavidla, které se při procesu svařování taví a tím uvolňuje plyny, které tvoří ochrannou atmosféru a zároveň se podílejí na metalurgických procesech ve svarové lázni.[1][2]

S postupem času při stále větším růstu průmyslu bylo zapotřebí, aby metoda dosáhla optimalizace. Ta postupně nastávala při kladení důrazu na zvyšující se výkony v oblasti rychlosti svařování, dále bylo zapotřebí rozšířit spektrum svařovaných materiálů při použití různých typů drátů o různých průměrech a průřezech. S touto problematikou byly vyvinuty nové druhy tavidel a v dnešní době metodu svařování pod tavidlem, zkráceně SAW, řadíme mezi konvenční metody, která jsou velmi využívány při svařování různých ocelových materiálů i složitějších tvarů při zachování vysokého navařovacího výkonu.[2]



Obrázek Proces svařování pod tavidlem

Mezi novodobé firmy ve strojírenství, které zahrnují ve výrobě i technologii svařování automatem pod tavidlem je firma Ammann, která se zaměřuje na výrobu válců jiných stavebních těžkých strojů. V této práci se zaměřuji na svařování válcového běhounu z nelegované konstrukční oceli označená jako S355. Svařované válcové běhouny jsou vyráběny ve firmě Ammann Nové Město nad Metují a slouží k válcování různých povrchů v sibiřských podmínkách při -40°C . Firma vlastní moderní svařovací stroj od firmy ESAB, který dokáže svařovat v širokém spektru svařovacích parametrů a to jak při stejnosměrném tak při střídavém proudu.[3,4]

Výsledkem práce by mělo být posouzení mechanických vlastností vzorků, které vznikly ze svařenců různých tloušťek a především různými parametry svařování. Výsledky by měly sloužit jako podklad k ověření, zda je výroba běhounů nastavena dobře, či dokážou-li nové parametry výrobu zefektivnit nebo zlepšit kvalitu svarového spoje. [3]



Válcovací stroj firmy Ammann [5]

1 ELEKTRICKÝ OBLOUK

Elektrický oblouk lze obecně definovat jako výboj v plynu. Tohoto se při svařování využívá k přeměně elektrické energie na tepelnou. Vzniká nejčastěji v místě mezi základním materiálem a elektrodou, přičemž intenzita proudu dosahuje spektra 10 až 2000A při nízkém napětí, které nabývá hodnot 10 až 50V. Předpokladem pro vznik oblouku je podmínka, aby napětí mezi materiálem a elektrodou bylo vyšší než ionizační napětí plynu při dostatečné proudové hustotě a elektrický výboj započne, když vylučované teplo zajistí ohřátí plynu na teplotu o hodnotách potřebných k ionizaci okolní atmosféry.[3,6]

Teplotu, tvar, ale i výkon oblouku lze podle technologických požadavků měnit. Tato možnost dala vzniknout více způsobům svařování jako například svařování tavící se elektrodou, obalenou elektrodou, svařování pod tavidlem, svařování v ochranných plynech MIG/MAG (obr. 1.1) a svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře TIG.[3,7]

Děje v procesu obloukového svařování probíhají velmi rychle a za vysokých teplot. Vliv na tyto děje mají následující faktory: [3]

- Tepelná vodivost základního materiálu, elektrody a plazmatu
- Polarita a tvar elektrody, geometrické uspořádání
- Chemické složení plazmatu, složení elektrod a okolní atmosféry



Obrázek 1.1 Hoření oblouku v procesu svařování [8]

1.1 Zapálení oblouku

V závislosti na geometrii elektrod a ionizační schopnosti okolní plynné atmosféry se velikost zápalného napětí u zdroje, jenž běží naprázdno, pohybuje v hodnotách 60-70V. Toto napětí je vyšší než při následném hoření oblouku.[3]

Samostatný start oblouku lze vyvolat těmito třemi způsoby:

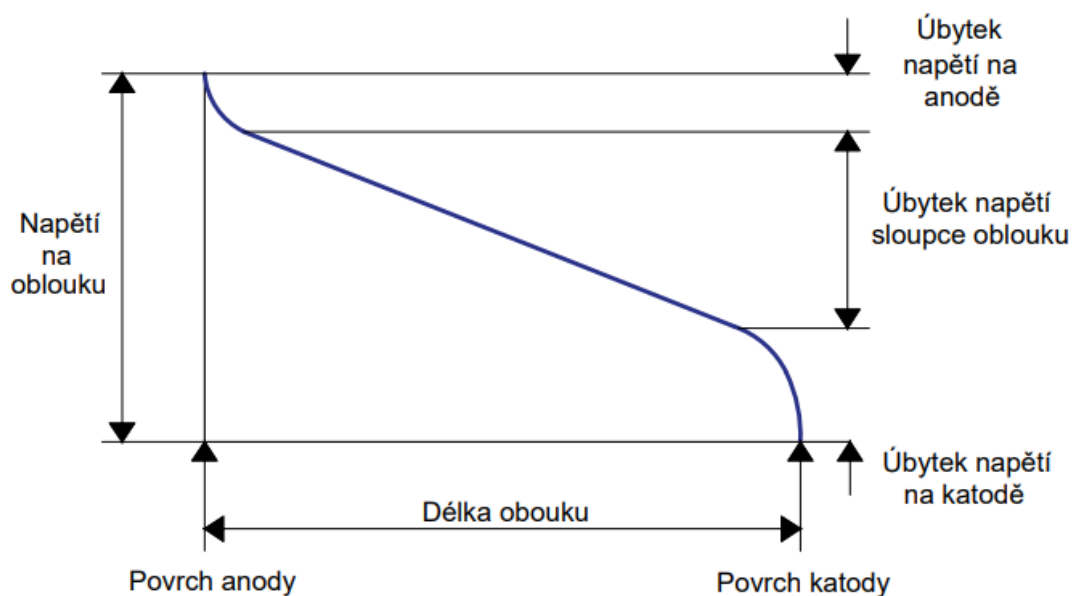
- Elektroda a základní materiál se v počátku dotknou a následně oddálí. Tímto způsobem se při dotyku elektrody a základního materiálu elektroda roztaví v důsledku vysokého přechodového odporu a dochází k emisi elektronů a následné ionizaci okolní plynné atmosféry. Při tomto způsobu zapálení nám postačí nízké hodnoty proudu.[3,6]
- Za přítomnosti ionizátoru, který generuje vysokonapěťové impulsy. Principem je vytvoření vysoce ionizovaného místa mezi elektrodou a základním materiálem působením impulsu na elektrodu. U střídavého proudu se tak děje pomocí jiskry, která prostředí zionizuje, anebo u střídavého proudu dochází k zapálení oblouku přechodem jiskrového výboje ve výboj obloukový.[3,6]
- U metody TIG se využívá zapalování startovacím proudem při dotykovém zapalování. Výhoda je možnost přesného umístění začátku svaru na svařenci. Princip je založen na hlídání svařovacích parametrů, startovací proud o hodnotě maximálně 10A ohřívá pouze špičku elektrody, která je nejčastěji z wolframu. Tento děj může trvat déle, ale při oddalování elektrody se řízeně zvyšuje proud, až na hodnotu svařování, kdy dochází k zapálení oblouku. [3,6]

1.2 Sloupec oblouku

Geometrie elektrického oblouku připomíná mírně se rozšiřující komolý kužel, který je charakterizován velmi intenzivně zářící oblastí ionizovaného plynu ve formě plazmy o teplotách v tisících stupňů celsia. Výsledná teplota oblouku závisí na složení plynu, hodnotě napětí a intenzitě proudu.[3]

Elektrická vodivost oblouku je důsledkem přítomnosti elektronů a iontů. Tyto částice vznikají termickou ionizací. To je děj, kdy se víceatomové molekuly plynů v ochranné atmosféře štěpí za vysokých teplot na atomy. Tyto nově vzniklé atomy se mezi sebou srážejí, a to i s primárními elektrony. [3]

Tím ztrácejí ze svého obalu elektrony (sekundární) a stávají se z nich ionty. Záporné elektrony jsou přitahovány anodou a kladné ionty katodou. Elektrický oblouk je nejčastěji ve stavu, kdy je v daném objemu oblouku a danou chvíli stejný počet záporných a kladných částic. [3,6]

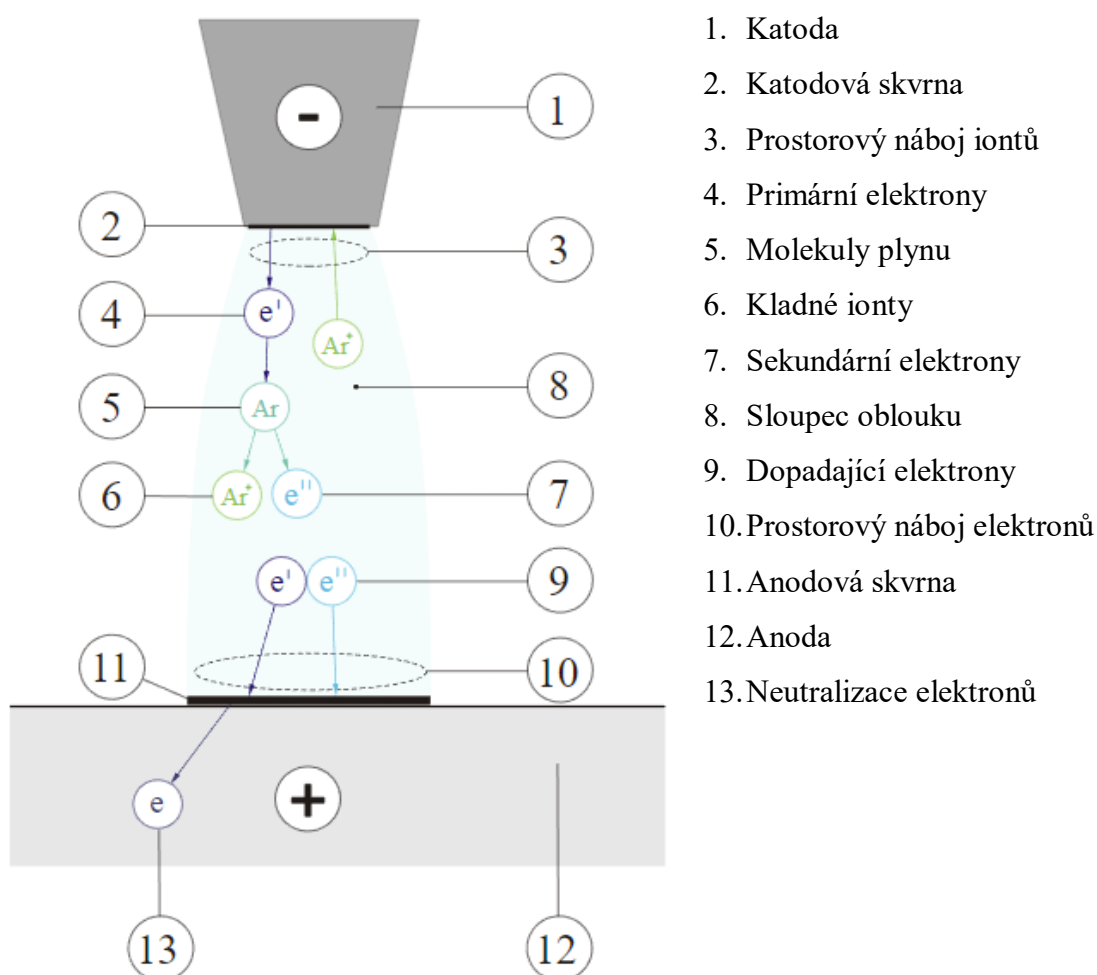


Obrázek 1.2.1 Rozložení napětí ve sloupci oblouku [3]

Každý elektrický oblouk při svařování má své tři základní oblasti, a to katodovou oblast, anodovou oblast a samotný sloupec oblouku. Tyto oblasti jsou charakterizovány různými úbytky napětí (obr. 1.2.1). [3]

Katodová oblast je místo, kde se vyskytuje horká katodová skvrna, čili ohraničená oblast, která emituje primární elektrony. Je závislá na teplotě a geometrii katody. Podle toho je buď stabilní, nebo má tendenci stěhovat se po povrchu katody. Proudová hustota se kvůli zúžení oblouku pohybuje v rozmezí 10^4 až 10^5 A.cm^{-2} . Do skvrny nalétají kladné ionty, přičemž předávají svou ionizační energii a ta napomáhá termoemisi elektronů. Vedle katodové skvrny je oblast katodového úbytku napětí, kde bývá úbytek v rozmezí 10 až 16V. Tento úbytek způsobuje prostorový náboj iontů a tím brzdí elektrony uvolněné z katody. [3,7]

Anodová oblast je místo charakterizováno anodovou skvrnou. Jsou zde pohlcovány (odváděny) a neutralizovány narážející elektrony (obr. 1.2.2). Zde se jejich energie pohybu mění na tepelnou. V místě skvrny se vyskytuje prostorový náboj elektronů a způsobuje úbytek napětí v rozmezí 4 až 8V. Při zvyšování proudu se úbytek napětí takřka nemění. Důležitý je proud, při kterém povrch anody dosáhne teploty tak vysoké, že odpařuje materiál z anody. Při dosažení nadkritického proudu se dostávají do anodové oblasti páry kovů, které tvoří anodu a tím dochází ke snížení ionizačního potenciálu plynů a dále ke snížení úbytku napětí v anodové oblasti. [3,7]

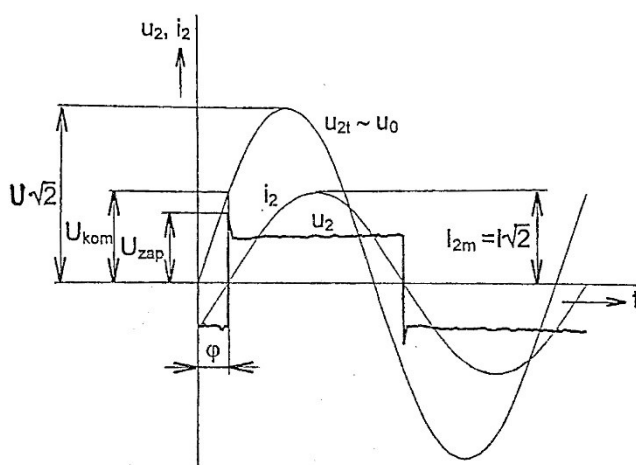


Obrázek 1.2.2 Elektrický oblouk ^[9]

1.3 Elektrický oblouk v obvodu střídavého proudu

Při procesu svařování je velmi důležitá stabilita oblouku, jelikož celý svařovací děj se dá posoudit jako dynamické chování, které je přímo závislé na vlastnostech svařovacích zdrojů a také na samotné technologii svařování. Stablní oblouk se projevuje lepším tvarem svarové housenky, rovnoměrném hoření oblouku a dále intenzitou nežádoucího rozstříku. K dosažení nejstabilnějšího procesu je zapotřebí mít správně nastavený svařovací zdroj, mít správný druh ochranného plynu, chemické složení elektrody vůči základnímu materiálu, a především dobře nastavené svařovací parametry. [3,6]

Obecně lze říci, že při svařování se nejstabilnější oblouk dosahuje při stejnosměrném proudu. Svařování střídavým proudem nám „zneklidňuje“ oblouk a to v momentě, kdy nám napětí na oblouku klesne pod ionizační napětí a tím oblouk zhasne. Poté se znovu zapálí při navýšení napětí. To vše je důsledkem periodické změny velikosti a směru proudu. Když proud klesne na nulový bod, kterého dosahuje na začátku a konci každé půlperiody, tak oblouk zhasíná a klesá nám teplota elektrod a sloupce plynu. Spolu s tím nastává i dezionizace plynu a sloupec ztrácí svou elektrickou vodivost. [3,7]



u_2 -průběh napětí na oblouku

u_{2t} -průběh napětí na zdroji

i_2 -střídavý proud jdoucí obloukem

U_{zap} -zápalné napětí

U_{kom} -komutační napětí

Φ -fázový posuv mezi proudem a
napětím zdroje

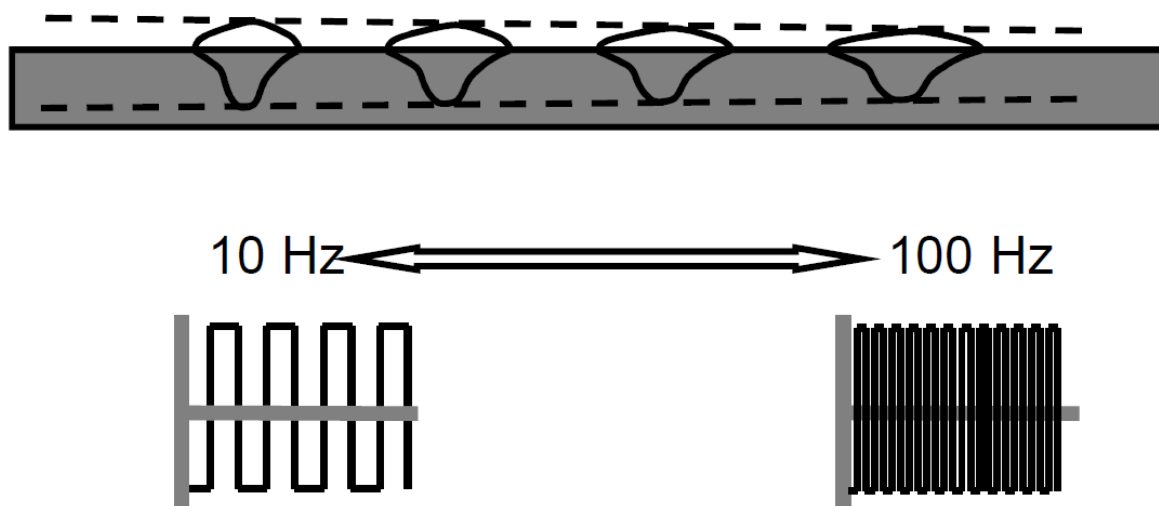
Obrázek 1.3.1 Průběh napětí na oblouku při svařování
střídavým proudem [3]

Pro opětovné zapalování oblouku je potřebné každou půlperiodou zvyšovat zápalné napětí. To se zajistí fázovým posuvem mezi napětím a proudem (obr. 1.3.1). Posuv se zajistí připojením například tlumivky do obvodu svařovacího zdroje. [3]

1.3.1 Využití střídavého proudu při svařování metodou SAW

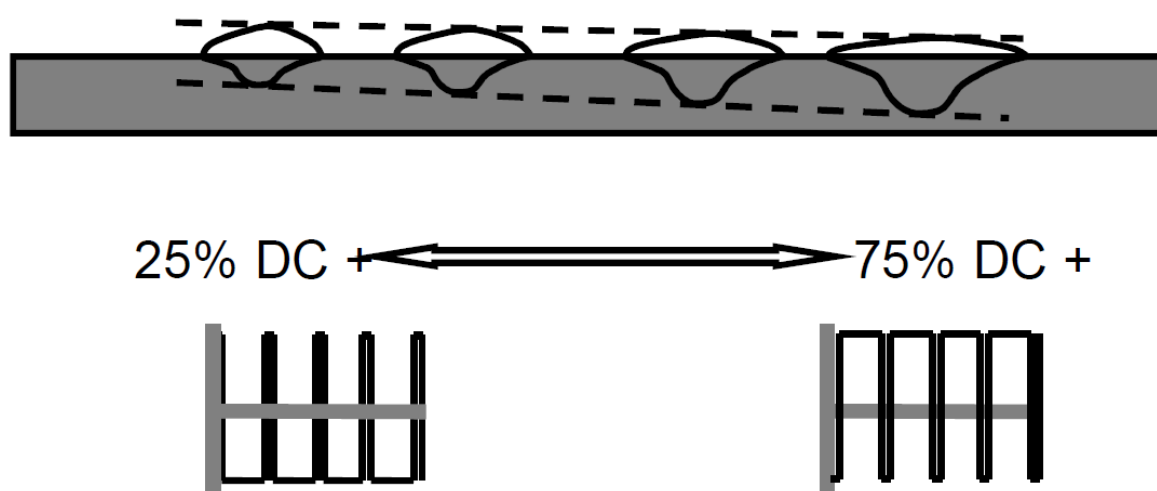
Moderní zdroje mohou při svařování střídavým proudem měnit tři parametry, které umí upravovat průběh svařování. Tyto parametry mají poté vliv na utváření housenky a hloubku závaru. Jedná se o frekvenci, balanc a offset.[4]

Frekvence nám udává, kolikrát se za jednu sekundu zopakuje perioda. Běžná síťová frekvence je 50Hz, ale moderní zdroje dokážou frekvenci zpomalovat ale i mnohonásobně zrychlovat. Při svařování nižší frekvencí docílíme většího průvaru (penetrace), nižší stability oblouku a menšího úhlu roztékání svarové lázně. Když frekvenci zvýšíme, svar má menší průvar, ale oblouk je stabilnější a svarová lázeň je širší. Grafické znázornění závislosti frekvence na tvar svaru lze vidět na obrázku 1.3.1.1. [4]



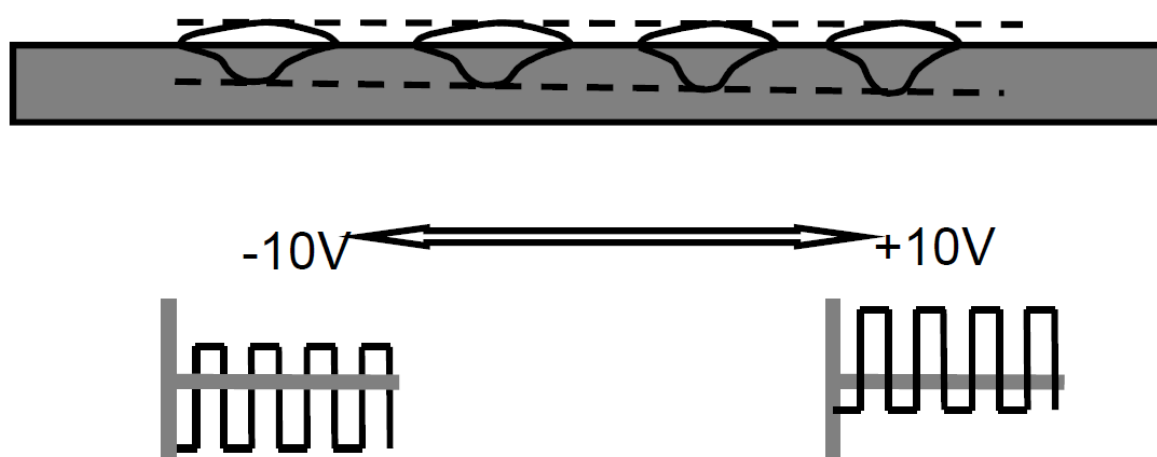
Obrázek 1.3.1.1 Vliv frekvence na průřez svaru [4]

Balanc je další parametr, kterým můžeme ovlivňovat budoucí průřez svarové housenky. Udává nám poměr mezi kladnou a zápornou polaritou. Čili při nastavení balance na 25% budeme mít 25% času periody kladnou polaritu a zbylých 75% času bude polarita záporná. Kratší doba kladné polarity nám zaručuje větší převýšení svaru, nižší průvar a menší rozlévání housenky. Naopak při prodloužení kladné polarity vůči záporné nám zajistí hluboký průvar, rozlévání svarové lázně do šířky a zároveň nízké převýšení svaru, jak lze vidět na obrázku 1.3.1.2. [4]



Obrázek 1.3.1.2 Vliv parametru balanc na průřez svaru ^[4]

Offset je parametr, který nám posouvá celkovou amplitudu o určitou hodnotu napětí. Při ubírání, kdy zdůrazňujeme zápornou polaritu, nám u svaru dochází k menší penetraci a širšímu rozlévání svarové lázně. Naopak při posunutí amplitudy do kladných hodnot docílíme větší penetrace a užší svarové lázně. Grafické znázornění lze vidět na obrázku 1.3.1.3. [4]



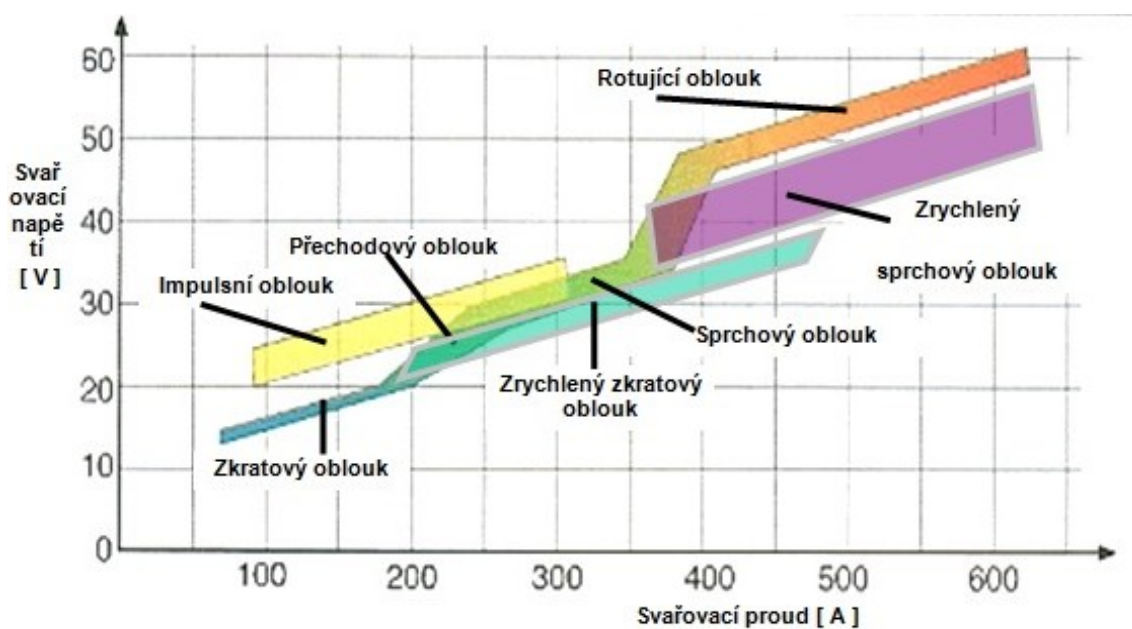
Obrázek 1.3.1.3 Vliv parametru offset na průřez svaru ^[4]

1.4 Přenos materiálu elektrickým obloukem

Podmínkou stabilního hoření oblouku je rovnováha mezi těmito faktory: rychlost podávání elektrody a rychlost natavování a pohyb roztaveného kovu z elektrody obloukem. Celý komplex fyzikálních podmínek jako závislost proudu, napětí, průměr elektrody a složení ochranné atmosféry nám vytváří širokou škálu možností přenosu roztaveného kovu z elektrody do svarové lázně. Dále tyto podmínky ovlivňují metalurgické děje, hlavně mezi ochrannou atmosférou a svarovým kovem. To nám ve výsledku ovlivňuje výsledný stav a mechanické vlastnosti svaru. [6,7,9]

Způsoby přenosu kovu rozlišujeme v závislosti napětí a proudu na (obr. 1.4.1):

1. krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu
2. krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem
3. přechodový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty (kapkový)
4. sprchový dlouhý oblouk s bezzkratovým přenosem
5. oblouk impulzní bezzkratový
6. moderovaný bezzkratový přenos – zrychlený zkratový přenos
7. oblouk s rotujícím přenosem kovu.



Obrázek 1.4.1 Grafické znázornění výskytu přenosu kovu v závislosti proudu a napětí ^[10]

2 METODY SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM

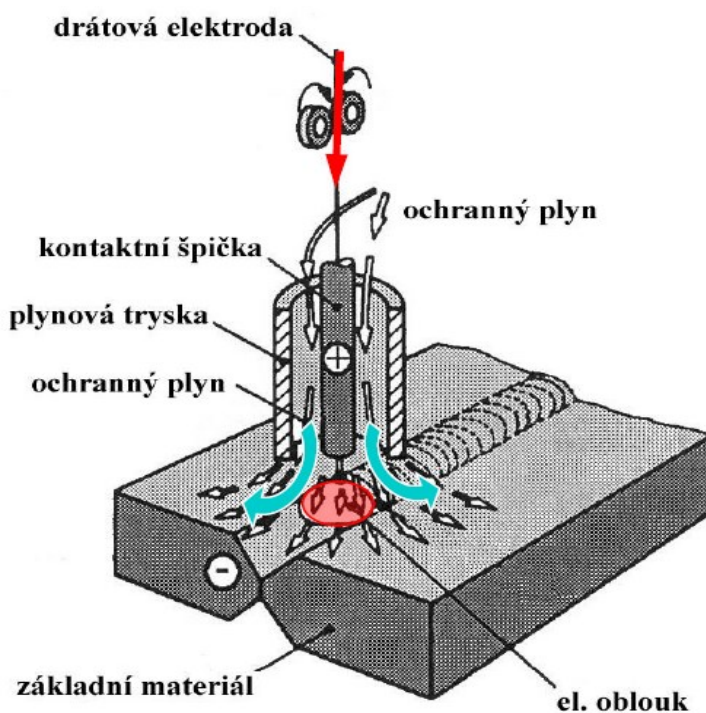
Metody obloukového (viz tabulka 1) svařování lze ve světovém měřítku řadit jako nejvyužívanější technologie ke svařování konstrukcí. Nejrozšířenější metodou je MAG, která ve velkém nahrazuje svařování ruční obalenou elektrodou. Pro svařování hliníkových konstrukcí se nejvíce využívá technologie MIG a to především pulzním proudem. Jelikož metody MIG/MAG jsou snadno ovladatelné, a tak našly velké uplatnění v odvětví robotizovaných systémů. Ve světě chemického, potravinářského, svařování trubek a jaderného průmyslu se využívá hojně metody TIG. Ta je nejčastěji používaná pro svařování nerezových, austenitických a niklových materiálů. Při svařování tlustých plechů běžných konstrukčních ocelí, kde není zapotřebí extrémně limitovat vnesené teplo, se užívá metody SAW, což je automatické svařování pod tavidlem. Tato metoda se prezentuje obrovskými svařovacími výkony. [6,10,11,12,]

Tabulka 1. Zkratky pro metody obloukového svařování [5]

Zkratka	Celý název
MAGM	MAG svařování ve směsném plynu
MAGC	MAG svařování v plynu CO ₂
MAGp	MAG svařování pulsem
MIGp	MIG svařování pulsem
GMAW	totožný název pro MAG
GMAW - s	MAG svařování zkratem
GMAW - p	MAG svařování pulsem
GTAW	totožný název pro TIG/WIG
MOG	svařování tavicí elektrodou bez ochranného plynu
SMAW	svařování obalenou elektrodou
MMA	ruční svařování obalenou elektrodou
SAW	svařování automatem pod tavidlem
PAW	svařování plazmou
PAC	řezání plazmou

2.1 MIG/MAG

Tato metoda svařování je charakteristická zejména přídavnými materiály, chemickými reakcemi ve svarové lázni a chováním elektrického oblouku změnou svařovacích parametrů. Metoda je založena na principu hoření oblouku mezi základním materiálem a tavící se elektrodou ve formě drátu nebo plněné trubičky (obr. 2.1.1). Tento proces je obklopen ochrannou atmosférou skládající se z aktivních a inertních plynů. Výhoda této metody je široké spektrum kombinací svařovacích parametrů, průtoku plynu, rychlostí podávání drátu a možnost aplikace na robotizované systémy. [6,]



Obrázek 2.1.1 Schéma metody MIG/MAG ^[13]

Metoda MIG a MAG jsou víceméně totožné, mají pouze malý rozdíl. Ten spočívá v užití plynu tvořící ochrannou atmosféru. U metody MAG je to CO_2 a jeho směsi s argonem nebo kyslíkem. Samotný název vznikl z anglického „metal active gas“ což znamená kov aktivní plyn a jak už z názvu vyplývá, tak se výše zmíněný CO_2 aktivně účastní svařovacího procesu a chemických reakcí ve svarové lázni. Název MIG je z anglického „metal inert plyn“, což lze do češtiny přeložit jako plyn netečný plyn a z názvu lze odvodit, že plyn pouze slouží jako ochrana celého procesu svařování od vzdušné atmosféry. [7]

Důležitým faktorem pro svařování v aktivní atmosféře je přídavný materiál ve formě drátu, ten má podobné chemické složení jako základní materiál jen je legovaný prvky jako

křemík a mangan. Tyto prvky během procesu svařování reagují s oxidy železa a ve formě strusky vyplouvají jako oxidy manganu a křemíku. Tomuto procesu se říká dezoxidace a zabavuje nás přebytečného kyslíku ve svaru. Dráty se dodávají v cívkách o hmotnosti 15 kg a průměrech 0,6 – 1,2 mm. Metodou je možné svařovat ve mnoha svařovacích polohách i při relativně vysokých svařovacích rychlostech až $150 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tyto rychlosti ale zajišťují mechanizované systémy a navíc hodnoty proudu zde dosahují hodnot až 800 A.[7]

Oblast využití metody MAG nalezneme především při svařování nelegovaných konstrukčních ocelí, různých plechových svařenců. Metoda MIG našla širokého uplatnění při svařování nerezů, hliníku a jeho slitin, slitin mědi a vysoce legovaných ocelí. [7,11]

Dalším charakterizujícím prvkem těchto metod je přenos kovu do svarové lázně. Vyskytuje se nám zde například přenos zkratový, impulsní, kapkový, sprchový, rotační a moderovaný. [3 ,7,10]

Princip svařování se děje v určitém pořadí. Nejprve podavač tavidla osazený trubicí zajišťuje pravidelné dávkování tavidla. Toto dávkování musí být nepřetržité a co nejbližší svařovacímu procesu. Následuje podávání drátu do oblasti budoucího svaru v potřebném poměru. Po zapálení nám vzniká elektrický oblouk mezi základním materiálem a elektrodou. Následuje konstantní pohyb celé sestavy za určité rychlosti a při specifických svařovacích parametrech, aby byla zaručena požadovaná jakost spoje.[4]

Velké kvantum tepla, které se vytváří průchodem proudu do oblasti svařování natavuje konec elektrody v čase, kdy je elektroda blízko základnímu materiálu. Tím vyplňuje svarovou lázeň roztaveným svarovým kovem o specifickém chemickém složení, které by mělo zajišťovat mechanické vlastnosti podobné nebo lepší než základní materiál. Zároveň celý proces je chráněn vrstvou tavidla. Toto tavidlo se taví a může nám legovat svarový spoj. Po zchladnutí tavidla se nám na svaru vytvoří křehká, tvrdá, sklovitá vrstva, která je následně odstraněna z oblasti svaru.[3,4]

Výhody svařování metodou SAW:

- Zaručená vysoká kvalita svařování
- Nevznikají zápaly ani porezita svaru
- Nevzniká struska na povrchu svaru
- Obrovský výkon navaření
- Stálý průvar omezuje vznik studených spojů
- Velká tepelná účinnost
- Bez tepelného zatížení okolí
- Bez nutnosti odsávání kouře

Nevýhody svařování metody SAW:

- Nutnost důkladné přípravy svarových ploch
- Svařování v polohách PA, PB, ojediněle PC
- Žádná vizuální kontrola svařovacího procesu
- Vyšší náklady na svařovací operaci

3.1 Svařovací parametry

Svařovací rychlost i výkon navaření dosahují vysokých hodnot. Proto je zapotřebí, aby systém svařování byl mechanizovaný ve všech směrech. Žádný svářeč by nedokázal udržet plynulou rychlost svařování a podávání drátu a zároveň tak držet konstantní proud a napětí.[3,4]

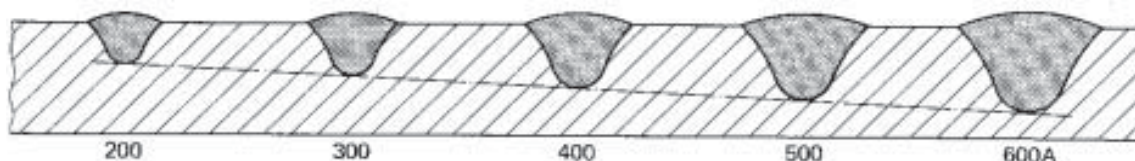
Mezi svařovacím napětím a vzdáleností elektrody od svařovací oblasti platí pravidlo, čím větší je vzdálenost mezi drátem a svařovací oblastí, tím je svařovací napětí vyšší. To platí i opačně. Když snížíme vzdálenost elektrody a svařové lázně, tak napětí nám klesá. Při dodržení konstantní vzdálenosti udržíme i konstantní napětí na oblouku.[4]

Podávání a rychlostí tavení drátu musí být řízeno řídicí jednotkou, která zaručuje a mění rychlost podávání v závislosti na změnách svařovacího napětí. Toto je zapotřebí, když nastane situace, kdy svařovací proud procházející svařovanou oblastí roztaví elektrodu rychleji, než je drát podáván. To nám zvětší vzdálenost mezi elektrodou a lázní, a tudíž se napětí na oblouku zvětší. Platí to i obráceně, když drát je dodán rychleji než jeho odtavování, tak se vzdálenost zmenšuje a napětí klesá.[4]

Při použití zdroje s konstantním napětím se napětí na oblouku vytváří zdrojem a velikost svařovacího proudu je řízena rychlostí podávání drátu. Při zvyšování rychlosti podávání se nám úměrně zvyšuje i svařovací proud. [4]

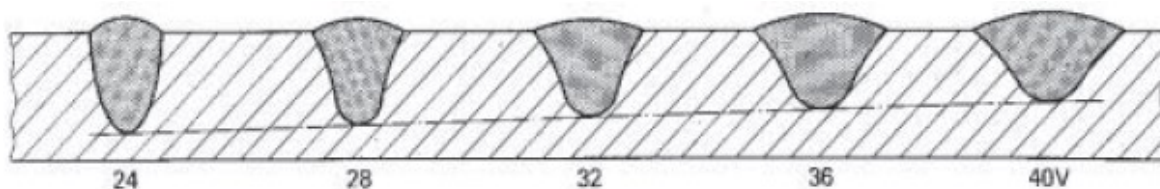
Pro docílení svarů o vysoké a stálé kvalitě je zapotřebí znát a optimalizovat proměnné podmínky, především svařovací proud, napětí a rychlost.

Svařovací proud má jako svařovací parametr největší vliv na celý proces svařování. Nejenže řídí odtavování elektrody, do jaké hloubky máme závar, ale také množství nataveného základního materiálu. Při příliš vysokých hodnotách proudu hrozí velká hloubka závaru (obr. 3.1.1) a protavení podložky a také vnesené teplo bude vytvářet širokou zónu tepelně ovlivněné oblasti. Naopak při nízkém proudu dochází ke špatnému provaření a nízkému převýšení svaru. [3,6]



Obrázek 3.1.1 Vliv svařovacího proudu na profil svaru^[4]

Svařovací napětí udává rozdíl potenciálu mezi koncem svařovacího drátu a svarovou lázní. Zároveň se mění se změnou vzdálenosti mezi těmito body. Napětí má zanedbatelný vliv na množství navařeného drátu, to je ovlivněno hlavně hodnotou svařovacího proudu. Napětí nám ovlivňuje hlavně převýšení svaru a tvar tavné lázně. Při vyšším napětí docílíme širší svar s menší hloubkou průvaru (obr. 3.1.2).[3,4]



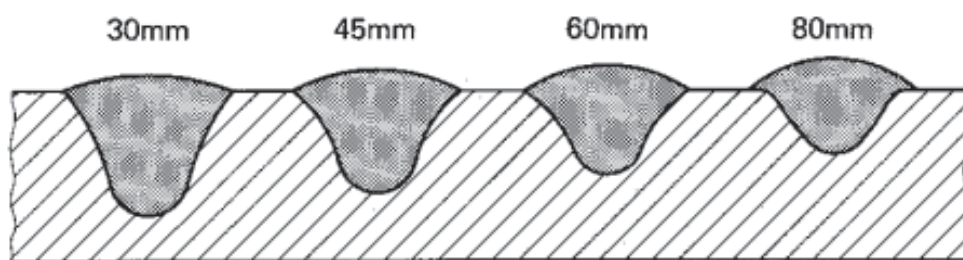
Obrázek 3.1.2 Vliv svařovacího napětí na profil svaru ^[4]

Svařovací rychlost je závislá na svařovacím proudu a napětí podle následujícího modelu. Při zvyšování svařovací rychlosti se zmenšuje množství vneseného tepla na jednotku délky svaru, zmenšuje se průřez svařovací housenky, snižuje se hloubka penetrace a vzniká riziko malého převýšení a utváření vrubů.[4]

Při snižování svařovací rychlosti zvyšujeme množství vneseného tepla na jednotku svaru, snižujeme hloubku penetrace a zvětšujeme průřez svarové housenky. Důsledkem příliš velké svarové housenky je pomalé ochlazování a následný růst zrna a to má za následek snížení mechanických vlastností, především vrubové houževnatosti. Při příliš velkém omezení svařovací rychlosti dochází k snižování penetrace z důvodu, že se nám část svařovací lázně roztéká pod elektrodu a lázeň je vyplňována penetračními silami oblouku.[4]

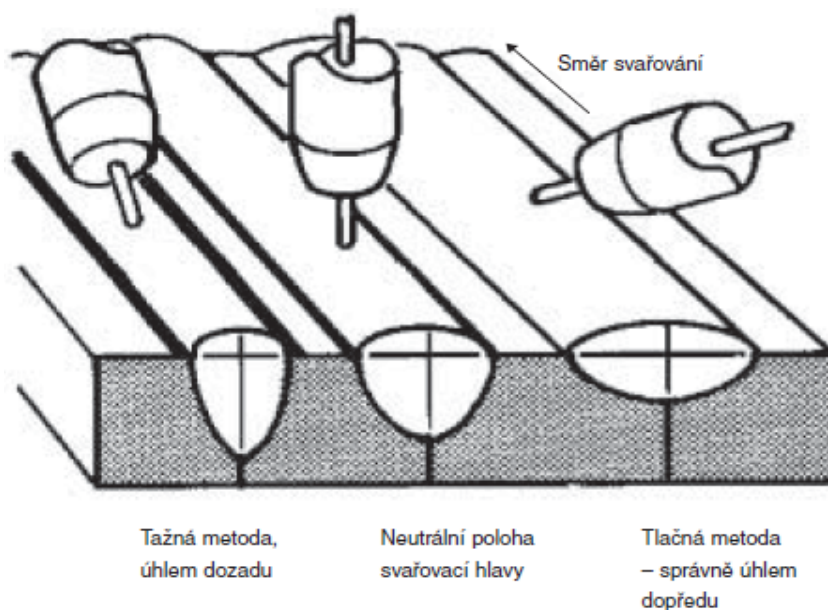
Dávkování tavidla je potřeba rovněž udržovat v optimální hodnotě. Při příliš vysoké vrstvě tavidla nám vzniká hrubý povrch svarové housenky. To je způsobeno špatným únikem plynů, které při svařování vznikají. Ty se pod vrstvou tavidla dusí a deformují povrch housenky. Naopak při příliš malém dávkování tavidla dochází k nedostatečné ochraně svařovacího procesu a vznikají nám nežádoucí výronky, rozstřík a svar bude špatně vypadat se znatelným výskytem porozity. Každé svařování má svou optimální vrstvu tavidla, to se dá zjistit pomalým snižováním dávkování tavidla až do okamžiku, kdy zjistíme ztrátu vlivu.[4]

Výlet elektrody je další svařovací parametr mající vliv na profil svaru (obr. 3.1.3). Výlet je vzdálenost mezi svařencem a koncem kontaktní špičky u elektrody. Optimální vzdálenost se pohybuje kolem 20 – 40mm. Při zvýšení výletu se nám zvyšuje výkon navaření důsledkem ohřátí drátu odporovým ohřevem. Při příliš velkém výletu může dojít až k situaci, že omezíme penetraci do materiálu. [4,6]



Obrázek 3.1.3 Vliv výletu elektrody na profil svaru ^[4]

Úhel nastavení svařovací hlavy má rovněž vliv na utvářející se tvar svarové housenky a penetrace. Při svařování „úhlem dozadu“ neboli pulling docílíme větší penetrace do základního materiálu a zároveň získáme větší převýšení housenky. Nevýhodou je, že se vyskytuje riziko vzniku vrubů. Naopak při takzvané „tlačné“ metodě svařování (úhlem dopředu) získáváme širší svar s nižší hloubkou penetrace a menším převýšením, ale nevzniká nám zde riziko vrubu. Obě tyto metody jsou znázorněny i s metodou neutrální polohy na obrázku 3.1.4. [4,6]



Obrázek 3.1.4 Vliv nastavení svařovací hlavy na tvar svaru ^[4]

3.2 Přídavné materiály

Oproti metodám MIG/MAG a TIG, kde je přídavným materiálem drát a ochranný plyn, máme u metody svařování pod tavidlem drát a tavidlo. Drátěné elektrody se dodávají v průměrech 2 – 5mm. Pro svařování jemnozrnných a nelegovaných konstrukcí používáme dráty dle normy ČSN EN ISO 14171, pro tvrdé a korozivzdorné návary užíváme plněné dráty a elektrody ve formě pásků pro korozivzdorné návary. Odvětví svařování legovaných ocelí metodou SAW nemá příliš velký výběr normalizovaných drátů, proto je vyráběno velké množství drátů, které nejsou normalizovány.[3,4]

Dalším přídavným materiálem jsou tavidla, ty jsou uvedena v normě ČSN EN ISO 14 174. Tavidla rozdělujeme podle účelu na aktivní, legující a neutrální. Podle výroby na tavná, aglomerovaná, sintrovaná a podle chemického složení. Tavidla se vyrábějí o zrnitosti 0,25 – 2,5 mm a před použitím musí být důkladně vysušena. Například aglomerovaná tavidla se suší po dobu 2 hodin při teplotě 300°C. Účinek tavidla se dá zvyšovat či snižovat svařovacími parametry. Při zvýšení napětí nebo délky oblouku můžeme docílit vyššího stupně legování nebo naopak, můžeme docílit většího propálení jiných prvků.[3,4]

Aktivní tavidla ve svarovém kovu zvyšují především obsah křemík, který má za úkol dezoxidovat svar. Dále dodávají mangan, který zvyšuje odolnost vůči pórovitosti a zvyšuje houževnatost, dále také uceluje povrch svaru a zlepšuje jeho vzhled. Aktivní tavidla se používají hlavně pro svařování jedné housenky. Ojedinele pro vícevrstvé svary, maximálně 3–5 vrstev.[3,6,7]

Neutrální tavidla jsou určena pro vícevrstvé svařování. Je zde omezení na legující prvky jako Si a Mn. Lze očekávat, že chemické složení v jedné vrstvě bude totožné jako v ostatních vrstvách svaru. Tudíž bude chemická analýza čistého svarového kovu vykazovat rovnovážný bod. Při užití neutrálních tavidel pro jednovrstvé svařování musíme počítat se zvýšeným obsahem Mn a Si ve svarovém kovu. [3,6,7]

Legující tavidla se využívají především při svařování v kombinaci s nelegovanými dráty. Je potřeba zvyšovat obsah určitých legujících prvků. Například při navařování zvyšujeme stupeň C a Cr, ale také Mn a Si. Výše legování je závislá na napětí na oblouku. To má vliv na přechod legujících prvků z tavidla do svarové lázně a na aktivaci chemické reakce. Proto musí být při užití legujících tavidel napětí na oblouku přísně hlídáno. [3,6,7]

Tavená tavidla (obr 3.2.1) jsou vhodná pro nelegované materiály a jejich výroba je uskutečněna v elektrických obloukových pecích[3,6,7]

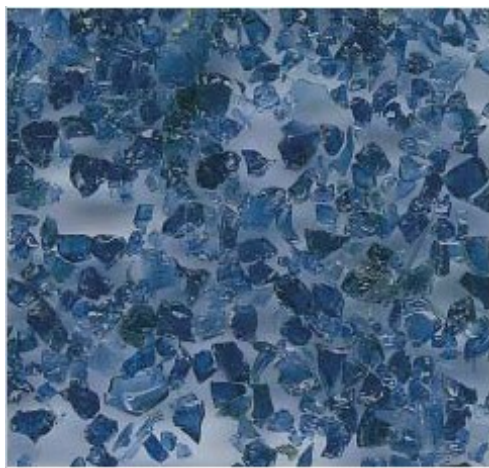
Keramická (aglomerovaná) jsou často legovaná tavidla určená pro navařování s přesným chemickým složením. Vyrábí se z práškových komponentů a spojována jsou vodním sklem (obr. 3.2.2). [3,6,7]

Sintrovaná tavidla vynikají v oblasti svařování legovaných materiálů. Jsou vhodná do úzkých úkosů a disponují snadnou odstranitelností strusky. Spékají se za působení vysokého tlaku z práškových komponentů. [3,6,7]

Podle chemického složení máme tavidla:

Zirkon – silikátová (ZS), mangan – silikátová (MS), aluminát – silikátová (AS), kalcium – silikátová (CS) a rutil – silikátová (RA)

aluminát – rutilová (AR), aluminát – bazická (AB) a aluminát – fluorid – bazická (AF)
fluorid – bazická (FB). [3,4]



Obrázek 3.2.1 Tavené tavidlo ^[4]

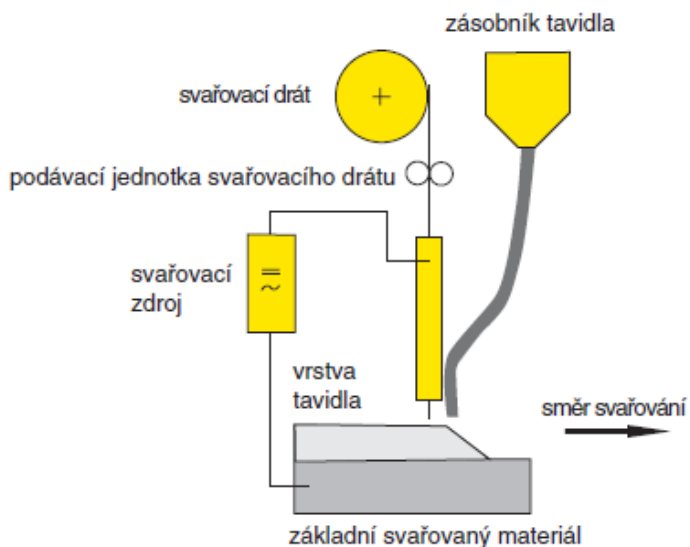


Obrázek 3.2.2 Aglomerované tavidlo ^[4]

3.3 Varianty svařování pod tavidlem

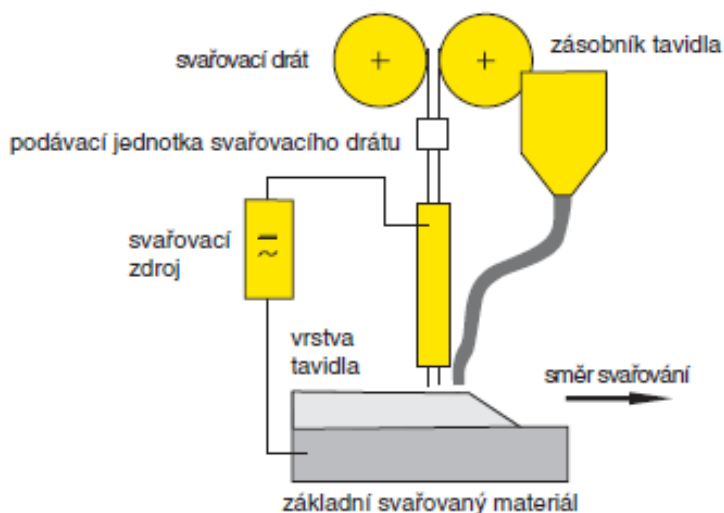
Základním principem je svařování jedním drátem. Přičemž výkon odtavení je 12kg/hod. Tyto hodnoty lze například metodou twin-wire mnohonásobně zvýšit přidáním více drátů do procesu svařování, nebo zvýšit počet svařovacích hlav u tandemového svařování. U multidrátové technologie se pak můžeme dostat i do hodnot odtavení až 90 kg/hod. [3,4]

Svařování **jedním drátem** je nepoužívanější princip. Užíváme dráty o průměrech 2 – 4mm, výjimečně při svařování tenkých plechů velkými rychlostmi se používají dráty 1,2 – 1,6 mm. Nejčastěji se aplikuje zapojení DC+ a výlet drátu má hodnoty 20 - 40 mm. Použitím drátů o menších průměrech se stejnou hodnotou proudu docílíme vyšších hodnot odtavení a docílíme svarů s větší hloubkou penetrace a užší svarovou housenkou.[4]



Obrázek 3.3.1 Schéma svařování jedním drátem [4]

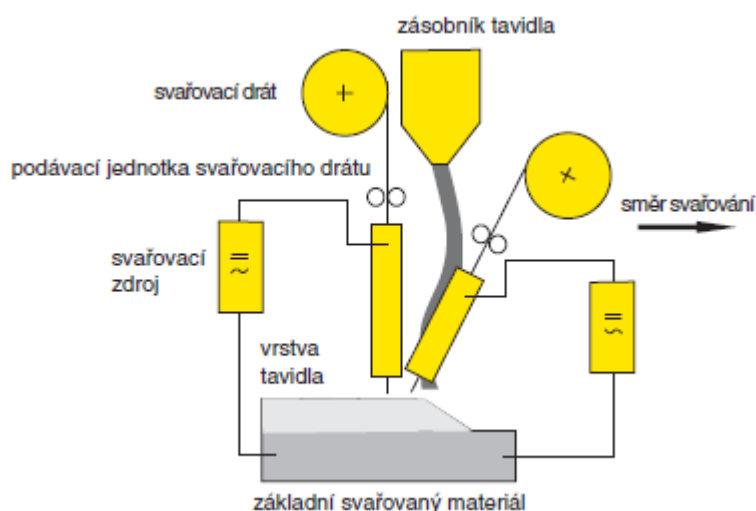
Svařování **Twin-Wire** je metoda při které používáme dva dráty, oba jsou napojeny na stejný svařovací zdroj. Používá se zdroj s dvojitým kontaktním průvlakem a dvojitým kladkovým podáváním. Výkon odtavení je navýšen až o 30% oproti užití jednoho drátu a navíc lze použít vyšších hodnot proudu i svařovacích rychlostí především svařování koutových spojů ale i při svařování tupých svarů.[4]



Obrázek 3.3.2 Schéma svařování Twin-Wire [4]

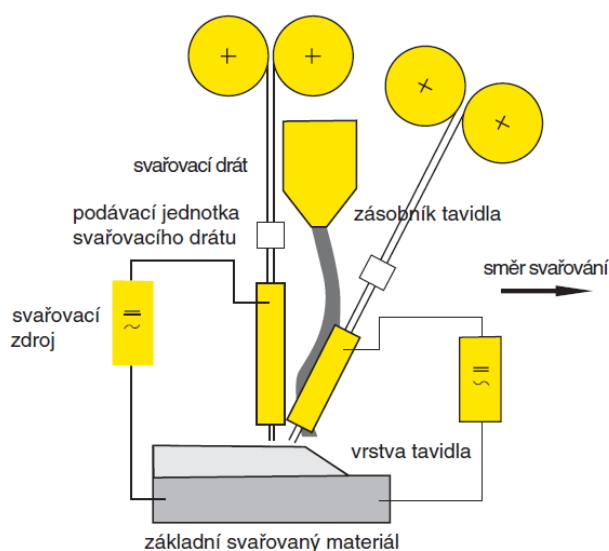
Užitím **tandemového** svařování má každá elektroda svůj vlastní svařovací zdroj a vlastní kladkový systém podávání drátu. První (vedoucí) oblouk je napájen vysokou

hodnotou stejnosměrného proudu DC+ a při nastavení nízkého napětí nám utváří hluboký průvar. Druhý drát je svým zdrojem napájen obvykle nižší hodnotou střídavého proudu AC a jeho úkolem je vyplnit svar a utvářet hladký povrch svaru. Používají se dráty 3 – 5 mm a výkon odtavení je až dvojnásobný oproti použití metody s jedním drátem.[4]



Obrázek 3.3.3 Schéma tandemového svařování [4]

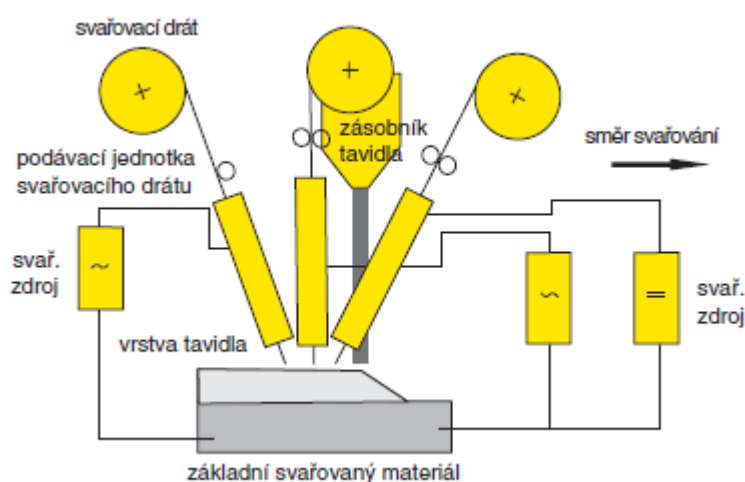
Dvojité tandemové svařování je metoda dalšího zvýšení výkonu. Užívá dvě dvoudrátové hlavy, které jsou umístěny za sebou. Nejčastěji jsou použity 4 dráty o průměru 2,5 mm a výkon odtavení dosahuje hodnot až 38 kg/hod. Metoda je využívána především pro spoje, kde je zajištěna dobrá přístupnost pro svařovací zařízení. Je to například obvodové svařování při výrobě větrných věží.[4]



Obrázek 3.3.4 Schéma dvojitého tandemového svařování [4]

Multidráťová technologie

využívá současně 4–6 drátů, přičemž každý má svůj vlastní proudový zdroj. Metoda je podobná jako u tandemového svařování dvěma dráty, první drát svařuje DC+ a ostatní jsou připojeny na zdroje AC. Metodou lze docílit rychlosti svařování až 2,5m/min a výkon odtavení dosahuje hodnot až 90 kg/hod.



Obrázek 3.3.5 Schéma multidráťového svařování ^[4]

Metoda je například pro podélné svařování při výrobě trub. [4]

Tabulka 3. Charakteristika metod svařování pod tavidlem ^[4]

Metoda	Jedním drátem	Twin-Wire	Tandemové	Dvojitě tandemové	Multidráťové
Počet drátů	1	2	2	4	3 - 6
Počet zdrojů	1	1	2	2	3 - 6
Průměry drátu (mm)	1,6 - 5	1,2 - 3,0	3,0 - 5,0	2,5 - 3,0	3,0 - 5,0
Proudový rozsah (A)	200 - 1000	400 - 1200	1500 - 2400	1500 - 2200	2000 - 5500
Druh proudu	DC+	DC+	DC+, AC	DC+, AC	DC+, AC, AC
Napětí pro jeden drát (V)	25 - 38	26 - 38	28 - 38	26 - 38	30 - 42
Výkon odtavování (kg/h) ,MAX‘	12	15	25	38	90

3.3.1 Zvyšování výkonu svařování pod tavidlem

Nejjednodušším způsobem, jak zvýšit produktivitu a výkon svařování, je použití plněné elektrody. To je způsobeno proudovou hustotou, která je vyšší než při užití plného drátu, protože proud je veden pouze obalem elektrody, a to má za následek až o 30% vyšší výkon odtavení. Navíc při aplikaci plněné elektrody není potřeba měnit existující zařízení. Dále pomocí plněné elektrody můžeme měnit chemické složení svaru a výsledné mechanické vlastnosti, kterých s užitím plného drátu nešlo docílit. Užitím plněné elektrody bude vždy nižší hloubka průvaru. To je potřeba uvážit při nastavování svařovacích parametrů v oblasti kořene a dále při svařování tupých svarů. Kombinací bazických plněných elektrod a tavených tavidel docílíme dobrých hodnot vrubové houževnatosti svaru. Plněné elektrody lze využít i při výše zmíněných metodách multidrátového svařování pro docílení ještě vyšších výkonů. Existují dva typy elektrody, které jsou v praxi užívány, a to plněné elektrody s bazickou náplní především pro tupé svary a plněné elektrody s náplní kovového prášku pro koutové svary. [3,4]

3.3.2 Svařování do úzkého úkosu

Je to modifikovaná technologie svařování pod tavidlem, která přináší obrovskou úsporu času a přídavného materiálu. Vedle toho snižuje teplotní zatížení svařovaného materiálu a nejvyššího využití má při svařování velkých tlustostěnných nádob. Zásadní vliv na dobré výsledky má samotné tavidlo. Problém však je, že svařování probíhá v úzké mezeře a tavidlo vytváří vysokou, tlustou vrstvu. Ta má negativní vliv na hoření oblouku a následné unikání plynu ze svarové lázně. Tím se nám vytváří nerovnoměrná hrbolatá struska, která zároveň nepravidelně formuje housenku. Dalším problémem je špatná odstranitelnost strusky z úzké mezery a to hlavně při svařování s vyššími teplotami. Proto je potřeba užít tavidla o správné bazicitě tak, aby výsledná struska byla dobře odstranitelná a aby tavidlo dobře formovalo výslednou housenku. Nejdůležitějším faktorem je ovšem koeficient teplotní roztažnosti svarového kovu a strusky. U strusky by měl být vždy vyšší než u svarového kovu a to už i při vysokých teplotách. Před samotným svařováním je nutná důkladná příprava a čistota svarových ploch. Užívá se drátů o průměrech 3 – 4 mm a do tloušťky 350 mm můžeme svařovat běžnými hlavami. Nad touto hranicí je potřeba speciální verze hlavy, která zajistí bezpečný průchod tavidla a drátu až do hloubky 500 mm v mezeře o tloušťce 10-15 mm. Tak se například svařují sudy pro radioaktivní odpad. [3,4]

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Svařování zkušebních svarových spojů proběhlo ve firmě Ammann. Svařovaly se 4 zkušební desky, které odpovídají vyráběným válcovým běhounům. Dvě desky byly svařeny o tloušťce 40 mm a dvě o tloušťce 25 mm. Geometrie svarů byla do X. U desek o tloušťce 40mm s otupení v kořenové oblasti 12mm a u tloušťky 25mm s otupení v místě kořene 5 mm. Obě zkušební desky o tloušťce 40 mm a jedna o tloušťce 25 mm byly svařovány automatem pod tavidlem. Druhá deska tloušťky 25 mm byla svařována metodou MAG. Při svařování vzorků byly přídavné materiály vzaty ze sortimentu firmy. Svařovací zdroj pro svařování automatem pod tavidlem má název Aristo 1000 a disponuje možností svařovat stejnosměrným i střídavým proudem. Po vyhotovení zkušebních spojů proběhly mechanické zkoušky v laboratořích ESAB a ostatní vyhodnocení ve školních laboratořích.

4.1 Základní materiál ocel S355J4

Tento materiál se řadí mezi běžné konstrukční oceli. Struktura oceli S355J4 jinak označována jako (1.0553, dříve 11 523) je jemnozrnná ocel, která je mikrolegovaná prvky Mn, Cr, Si a Mo. Dodává se v jakostních stupních JR, J0, J2, K2, N, M a NM. Je zde zaručená svařitelnost a lze jednoduše svařovat všemi metodami svařování. Při rostoucí tloušťce svařovaného materiálu nebo při tváření za tepla se mohou vytvářet trhliny za studena a proto je nutné počítat s předehřevem. Příčinou může být difúze vodíku do svarového kovu, zkřehnutí struktury v tepelně ovlivněné oblasti nebo koncentrace tahových napětí po procesu svařování.

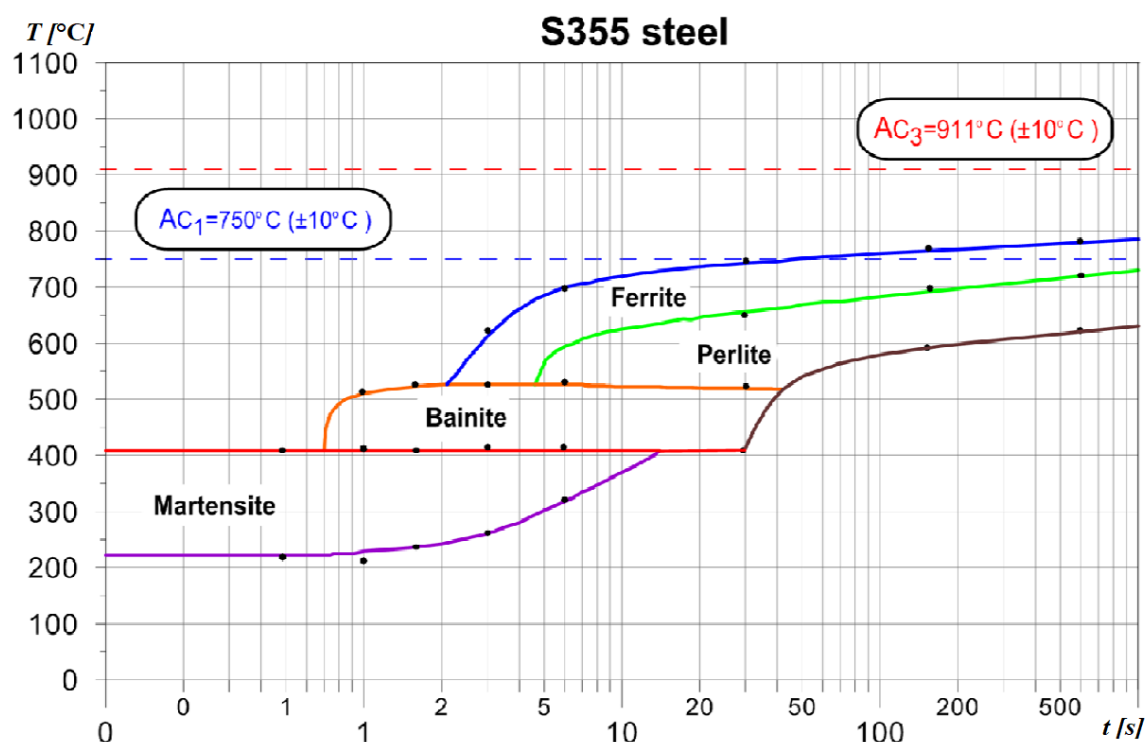
Chemické složení:

Tabulka 5. Chemické složení oceli S355

C	Si	Mn	P	S	Cu
0,22%	0,55%	1,6%	0,03%	0,03%	0,55%

Využití konstrukční oceli: Ocel S355 je možné použít pro tváření za studena i za tepla. Velká tažnost oceli může způsobovat problémy při obrábění díky špatné lámavosti třísky. V praxi se tato ocel používá například na mosty nebo svařované stavební konstrukce.

ARA diagram: Při svařování oceli S355 dochází v místě svaru a tepelně ovlivněné oblasti ke strukturním změnám. Podle diagramu ARA (obr. 4.1.1) se nám mohou při pozvolném ochlazování vytvořit struktury: martenzit, perlit, ferit a bainit.[14,15,16]



Obrázek 4.1.1 ARA diagram oceli S355 ^[17]

4.2 Charakteristika přídavných materiálů

Při svařování bylo použito stejných materiálů, které firma používá ve výrobě. Jednalo se o konstrukční jemnozrnnou ocel S355J4, která byla svařována poměděným drátem určeným pro svařování konstrukčních ocelí, k tomu bylo přidáváno aglomerované bazické tavidlo.

OK AUTROD 12.20 je označení firmy ESAB pro poměděný drát převážně určený pro elektrostruskové svařování nelegovaných konstrukčních ocelí až do pevnosti 580MPa. Při svařování tímto drátem je vhodná kombinace s tavidly označenými 10.62, 10.71, 10.72, 10.81 a 10.88.[18]

Chemické složení drátu: C = 0,10%, Si = 0,10%, Mn = 1,00%

Mechanické vlastnosti čistého svarového kovu a jeho chemické složení v kombinaci s tavidly je uvedeno na obrázku. 4.2.1.

OK 12.20+	C	Si	Mn	R _m MPa	R _{eL} MPa	A ₅ %	KV (J)/°C				
							+20	0	-20	-40	-60
OK 10.40	0,05	0,60	1,50	500	395	28	70	65	40		
OK 10.47	0,04	0,30	0,90	455	365	29			110	70	
OK 10.71	0,05	0,30	1,35	510	410	29	135	125	80	55	
OK 10.72	0,05	0,20	1,50	500	420	30				100	50
OK 10.81	0,07	0,80	1,45	610	510	25	80	60	40		
OK 10.88	0,05	0,60	1,70	520	400	24		70	50		

Obrázek 4.2.1 Vlastnosti drátu OK Autrod 12.20 [18]



Obrázek 4.2.2 Cívka drátu OK Autrod 12.20

OK FLUX 10.71 je označení pro nejpoužívanější tavidlo firmy ESAB z kategorie bazických aglomerovaných tavidel, které mají mírný efekt legování manganem a křemíkem. Využívá se pro svařování vícevrstvých tupých svarů, nebo svarů koutových převážně nelegovaných ocelí se střední až vysokou pevností. Možnost využití je pro jednodrátovou i multidrátovou technologii při použití střídavého i stejnosměrného napětí. Je zde zaručený nízký obsah vodíku ve svaru, maximálně 5ml/100g. Má vysoké využití v kombinaci s mnoha typy drátů, ale i plněných elektrod.[18]

Charakteristika tavidla:

Typ – bazické aglomerované $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{SiO}_2 + \text{CaF}_2$

Bazicita – B (1,5)

Sypná hmotnost – 1,2kg/dm³

Zrnitost – 0,2-1,6mm

Teplota přesušení 300°C/2 - 4hod.

Maximální proudová zátěž – 1000A pro jeden drát

Doporučené napětí 26 – 36 V

Orientační spotřeba tavidla při 580A,33m/hod, Ø4mm

Napětí (V)	26	30	34	38
Spotřeba tavidla DC+	0,70	1,00	1,30	1,60
(kg/kg drátu) AC	0,60	0,90	1,20	1,40

Obrázek 4.2.2 Spotřeba tavidla ^[18]

Doporučené svařovací parametry:

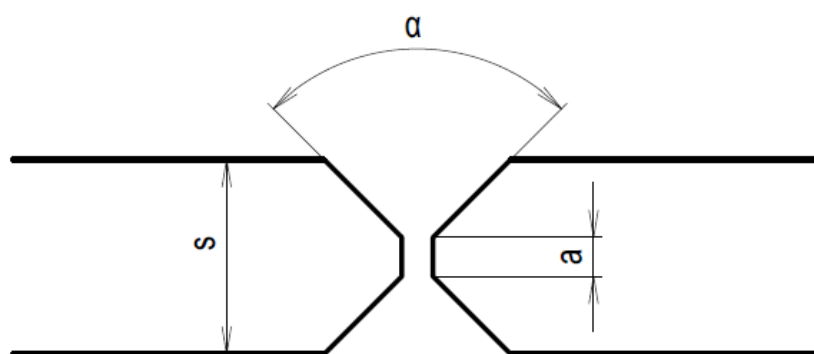
Ø drátu (mm)	Proud (A)	Napětí (V)		Rychlost (m/h)
		DC+	AC~	
2,5	300 - 400	26 - 28	28 - 30	16 - 30
3,0	400 - 500	26 - 28	28 - 31	20 - 35
4,0	500 - 600	26 - 30	29 - 32	22 - 40

Obrázek 4.2.3 Svařovací parametry pro tavidlo

OK FLUX 10.71 ^[18]

4.3 Technologie výroby válcového běhounu

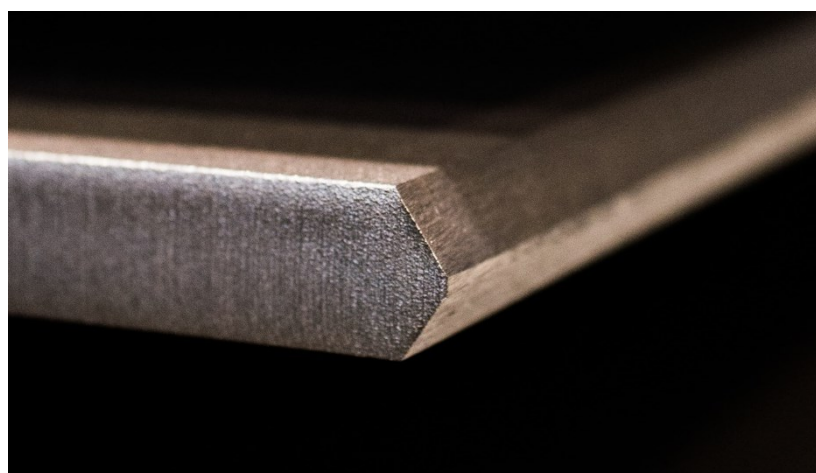
Podle velikosti válce se ve firmě zhotovují válcové běhouny z ocelových plechů o tloušťkách 13 – 40 mm. Než dojde k zakružení plechu na kruhový polotovar je zapotřebí důkladně připravit čisté svarové plochy. Geometrie svaru je znázorněna na obrázku 4.3.1 a připravená svařovací plocha na obrázku 4.3.2 Jedná se o svar typu X a rozměry jsou znázorněny v tabulce č. 6.



Obrázek 4.3.1 Geometrie svaru

Tabulka 6. Rozměry svaru typu X

Tloušťka plechu (s)	Otupení v kořenové oblasti (a)	Úhel rozevření (α)
25	5 mm	60°
40	12mm	60°



Obrázek 4.3.2 Připravený plech tloušťky 25mm

Po zhotovení čistých svarových ploch spolu s geometrií se musí plech zakružít. To je prováděno na válcových zakružovačkách značky Parmigiani (obr. 4.3.3). Tyto zakružovačky jsou schopny skružit plechy o tloušťkách 1 až 150 mm.

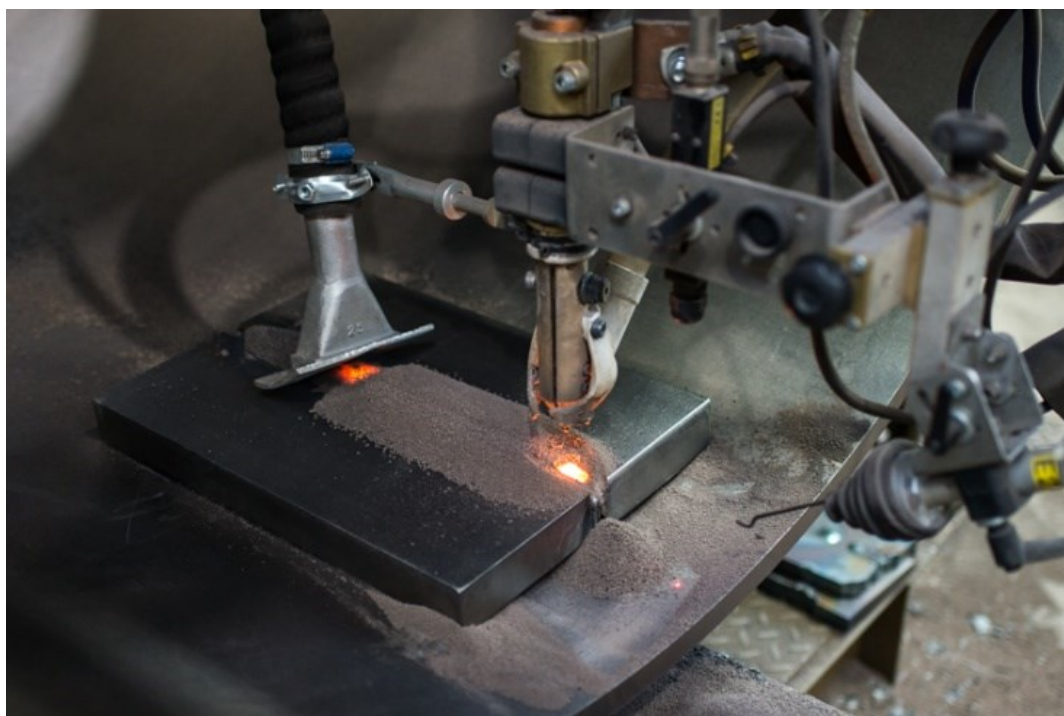


Obrázek 4.3.3 Zakružovačka Parmigiani

Po skružení plechů se bodově metodou MAG spojí konce plechu k sobě (obr. 4.3.4) a následuje samotné svařování. Běhouny s menší tloušťkou plechu se dají svařovat automatem pod tavidlem, ale i robotem metodou MAG. Veškeré skruže o větších tloušťkách se svařují metodou pod tavidlem.



Obrázek 4.3.4 Bodově svařený plech tloušťky 40 mm



Obrázek 4.3.5 Svařování desky 40 mm metodou pod tavidlem

Po zhotovení svarového spoje se broušením odstraní přebytečný návar na obvodu běhounu. Proto je zapotřebí, aby převýšení krycí vrstvy svaru bylo co nejmenší. Vybroušený svar běhounu je zobrazen na obrázku 4.3.6. Po vybroušení následuje vyvažování a kalibrace válců kvůli házení.



Obrázek 4.3.6 Vybroušený svar běhounu

4.4 Příprava svarových ploch

Před svařováním musí dojít k přípravě svarových ploch. Samotná úprava se provádí na CNC brusce (obr. 4.4.1). Před začátkem operace jsou všechny plechy důkladně tryskány. Tím se zbaví nečistot, okují, rzi a olejů.

Broušení svarů (obr 4.4.2) probíhá na CNC řízené brusce Kuhlmeier. Úkosey se brousí do tvaru X, přičemž otupení pro plechy do tloušťky 30mm je 5mm. Pro plechy nad 30mm je velikost otupení 12 mm. Úhel rozevření je 60° z vnitřní i vnější strany.



Obrázek 4.4.1 CNC bruska Kuhlmeier^[19]



Obrázek 4.4.2 Broušení svarových ploch

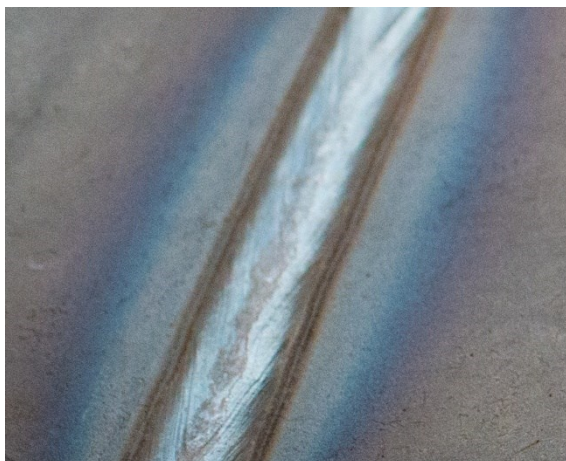
4.5 Svařování vzorků

Svařování zkušebních spojů se uskutečnilo ve výrobní hale firmy Ammann, kde probíhá výroba válcových běhounů. Zkušební deska označená A o tloušťce 40mm se svařovala metodou automatem pod tavidlem. Pro svaření kořenové oblasti byl použit stejnosměrný proud a pro výplň svaru střídavý proud. Zkušební deska B o tloušťce 25 mm byla svařována metodou MAG s použitím robotizovaného systému. Deska C byla svařována pomocí stejných parametrů svařování, které se používají při výrobě běhounů o tloušťce 40 mm. Deska o tloušťce 25 mm svařovaná automatem pod tavidlem je označená jako D a jedná rovněž o svařování s parametry, které se užívají při výrobě běhounu o těchto tloušťkách. Souhrnné parametry svařování jsou uvedeny v tabulce 7.

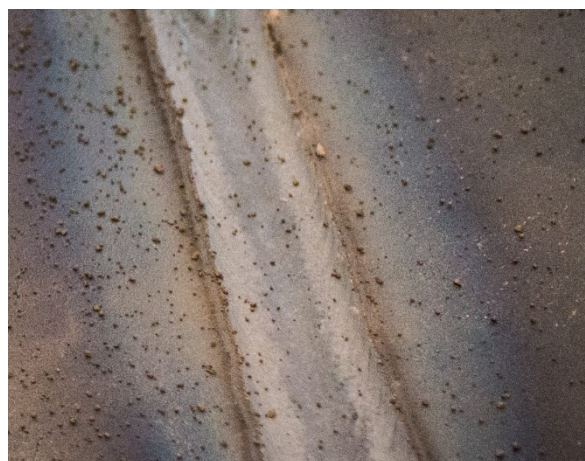
Tabulka 7. Parametry svařování zkušebních spojů

Vzorek	Deska A	Deska A	Deska B	Deska B	Deska C	Deska D
Parametry	(Kořen)	(Výplň)	(kořen)	(výplň)		
Proud	750 A, DC+	750 A, AC	360 A	360 A	720 A	630A
Napětí	27,5 V	35 V	38,5 V	38,5 V	30 V	30V
Svařovací rychlost	35cm* min ⁻¹	35 cm* min ⁻¹	70 cm* min ⁻¹	65 cm* min ⁻¹	14 cm* min ⁻¹	30 cm* min ⁻¹
Tloušťka desky	40		25		40	25
Frekvence	-	50 Hz	-	-	-	-
Balance	-	25%	-	-	-	-
Offset	-	-3 V	-	-	-	-
Frekvence kmitu	-	-	-	2 Hz	-	-
Amplituda kmitu	-	-	-	5 mm	-	-
Zpomalení na kraji kmitu	-	-	-	0,4 s	-	-
Metoda	SAW		MAG		SAW	SAW

Na obrázku 4.5.1 jsou uvedeny svarové spoje desek metodou automatem pod tavidlem. Jedná se o svařené desky o tloušťce 40mm. Deska A má kořen svařený pomocí DC a krycí housenka je svařována AC. Deska C je svařena jednou housenkou a stejnosměrným proudem.



Obrázek 4.5.1a Housenka desky A



Obrázek 4.5.1b Housenka desky C

Na obrázku 4.4.2 je ukázka z robotizovaného svařování válcového běhounu metodou MAG.



Obrázek 4.5.2 Svařování běhounu robotizovanou metodou MAG

4.5.1 Výpočet vneseného tepla

Pro výpočet vneseného tepla použijeme následující výpočet:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{v_s \cdot 1000} \text{ (kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \text{)} \quad (4.5.1)$$

Q – vnesené teplo

U – svařovací napětí

I – svařovací proud

η – účinnost (pro SAW 0,9-0,99)

v_s - svařovací rychlost (odečtená ze svařovacího zařízení)

Vzorek A

Parametry kořenu: DC, U = 27,5V, I = 750A, v_s = 35cm/min

$$Q_s = \frac{27,5 \cdot 750 \cdot 0,95}{5,8 \cdot 1000} = 3,38 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Parametry výplně: AC, U = 35V, I = 750A, v_s = 35cm/min

$$Q_s = \frac{35 \cdot 750 \cdot 0,95}{5,8 \cdot 1000} = 4,3 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Vzorek B

Parametry: DC, U = 38,5V, I = 360A, v_s = 70cm/min

$$Q_s = \frac{38,5 \cdot 360 \cdot 0,95}{11,7 \cdot 1000} = 1,13 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Vzorek C

Parametry: DC, U = 30V, I = 720A, v_s = 14cm/min

$$Q_s = \frac{30 \cdot 720 \cdot 0,95}{2,33 \cdot 1000} = 8,8 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Vzorek D

Parametry: DC, $U = 30\text{V}$, $I = 630\text{A}$, $v_s = 30\text{cm/min}$

$$Q_s = \frac{30 \cdot 630 \cdot 0,95}{5 \cdot 1000} = 3,6 \text{ kJ.mm}^{-1}$$

4.6 Zkouška tahem

Z připravených zkušebních svarových desek se nejprve vyřezaly vzorky pro příčnou zkoušku tahem svarového spoje. Z každé zkušební desky se vždy připravily dvě zkušební tělesa. Zkoušení probíhalo v laboratořích firmy ESAB na univerzálním trhacím stroji LabTest. Všechny vzorky byly přetrženy v oblasti základního materiálu a výsledné hodnoty zkoušky jsou uvedeny v tabulce 8.



Tabulka 8 Výsledky tahové zkoušky

Obrázek 4.6.1 Univerzální trhací stroj
LabTest ^[20]

Zkušební vzorek	Těleso 1	Těleso 2	Oblast přetržení
Vzorek A	505 MPa	503 MPa	Základní materiál
Vzorek B	511 MPa	518 MPa	Základní Materiál
Vzorek C	501 MPa	504 MPa	Základní materiál
Vzorek D	495 MPa	498 MPa	Základní materiál

4.7 Zkouška rázem v ohybu

Z připravených zkušebních svarových desek se nechaly zhotovit zkušební vzorky (obr. 4.6.1) pro zkoušku rázem v ohybu. Charpyho kladivo, na kterém byl prováděn pokus, vyvine nárazovou práci 300J. Válcové běhouny pracují v sibiřských oblastech. Na těchto místech teplota dosahuje až -40°C . Zkoušené vzorky byly lámány při podchlazení právě na tuto teplotu.

Na obrázcích 4.6.2, 4.6.3 a 4.6.4 je ukázka podchlazování vzorků ve 3 chladících boxech na teplotu -40°C . Podchlazování bylo prováděno suchým ledem, což je pevné skupenství oxidu uhličitého.



Obrázek 4.6.1 Připravené vzorky na zkoušku rázem v ohybu



Obrázek 4.6.2 Podchlazování vzorků



Obrázek 4.6.3 Teploměry ukazující teplotu v lázni



Obrázek 4.6.4 Sublimace oxidu uhličitého při ochlazování kovu



Obrázek 4.6.5 Správně umístěný vzorek v opěře

Lámání vzorků probíhalo na zkalibrovaném Charpyho kladivu Veb werkstoffprüfmaschinen leipzig (obr.4.6.6), které má nárazovou práci 300J a hmotnost samotného kladiva činí 18,75kg.



*Obrázek 4.6.6 Charpyho kladivo na zkoušku
rázem v ohybu*

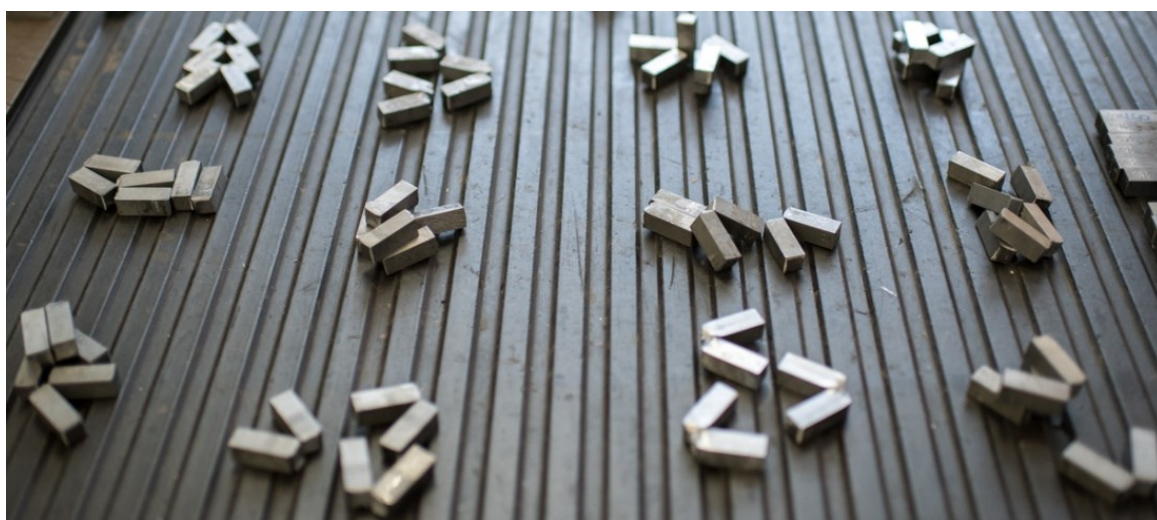
Z každého zkušebního svarového spoje, bylo odebráno 9 vzorků a zkoumané byly 3 oblasti. Oblast základního materiálu, svarového kovu a oblast teplotního ovlivnění, přičemž z každého místa byly odebrány 3 vzorky.

Výsledky zkoušky rázem v ohybu

Výsledné hodnoty zkoušky rázem v ohybu jsou uvedeny v tabulce 9 a zbytky zkušebních tělísek jsou na obrázku 4.6.7

Tabulka 9. Výsledky zkoušky rázem v ohybu

Vzorek	Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C	Vzorek D
Oblast				
Základní materiál	300, 300, 275	12, 38, 23	279, 300, 300	11, 11, 9
průměr	292	24	293	10
Svarový kov	35, 19, 38	31, 31, 31	24, 22, 22	10, 13, 14
Průměr	31	31	23	12
Tepelně ovlivněná oblast	65, 160, 211	10, 13, 12	17, 37, 33	40, 16, 17
průměr	145	12	29	24



Obrázek 4.6.7 Zbytky zkušebních vzorků

4.8 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Další mechanickou zkouškou vzorků byla zkouška tvrdosti podle Vickerse. Ta probíhala na tvrdoměru firmy WPM (obrázek 4.7.1). Hodnoty vpichů byly označovány jako HV10, což znamená, že hodnota zatížení je 10 kp. Zkoušení probíhalo v následujícím pořadí. Nejprve se provedly 3 vpichy do základního materiálu, poté 2 v oblasti TOZ a 3 v místě částečného natavení. Následovaly 3 vpichy v oblasti svarového kovu a dále 3 vpichy znovu v oblasti částečného natavení, 2 v oblasti TOZ a 3 opět v základním materiálu. Takto se následně vyzkoušely vzorky ze všech 4 svařených desek. Výsledné hodnoty zkoušky tvrdosti jsou uvedeny v tabulce 10.

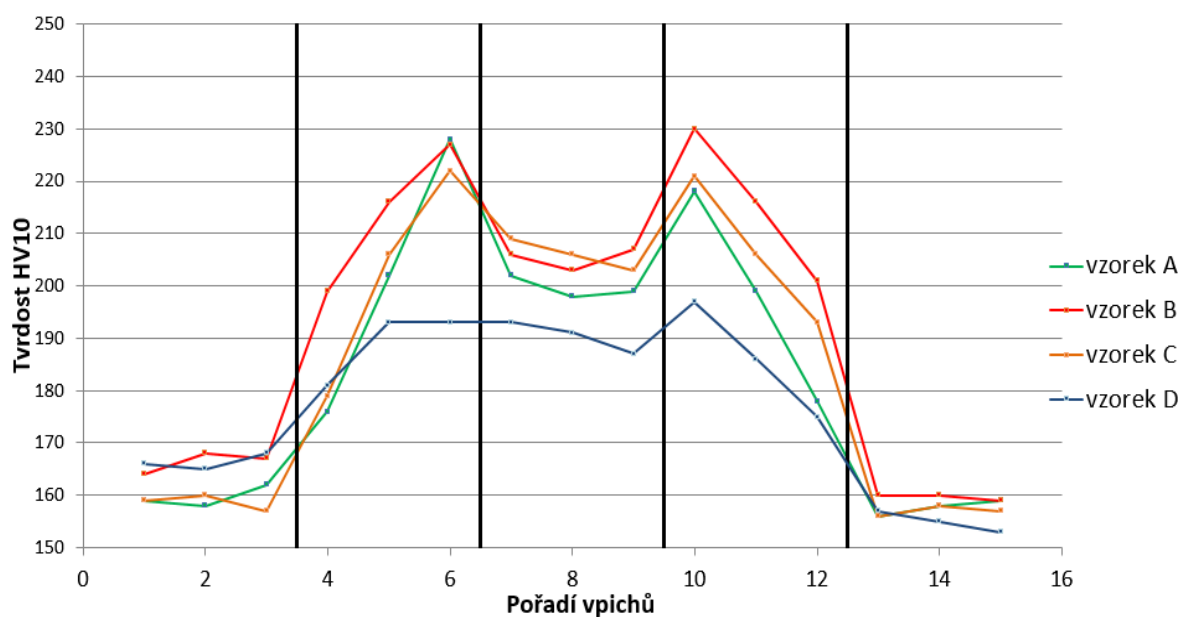


Obrázek 4.7.1 Tvrdoměr WPM

Tabulka 10. Výsledné hodnoty zkoušky tvrdosti podle Vickerse

HV10	Základní materiál	TOZ		Svarový kov	TOZ		Základní materiál
Vzorek A	159, 158, 162	176, 202	224	202, 198, 199	209	199, 178	156, 158, 159
			228		218		
			225		213		
Vzorek B	164, 168, 167	199, 216	222	206, 203, 207	233	216, 201	160, 160, 159
			227		230		
			228		228		
Vzorek C	159, 160, 157	179, 206	228	209, 206, 203	218	206, 193	156, 158, 157
			222		221		
			221		221		
Vzorek D	166, 165, 168	181, 193	192	193, 191, 187	193	186, 175	157, 155, 153
			193		197		
			196		198		

Výsledné hodnoty můžeme vidět zpracované na obrázku 4.7.2. Je zde znázorněno 5 oblastí vpichování. Ty jsou shodné s oblastmi uvedenými v tabulce 15. Vlevo máme oblasti v příčném řezu a podle pořadí vpichů máme nejdříve oblast základního materiálu, pásmo TOZ a poté svarový kov. Následují oblasti vpichování do povrchu na horní straně vzorku. Po svarovém kovu máme vpichy v oblasti TOZ a vpichy do základního materiálu.



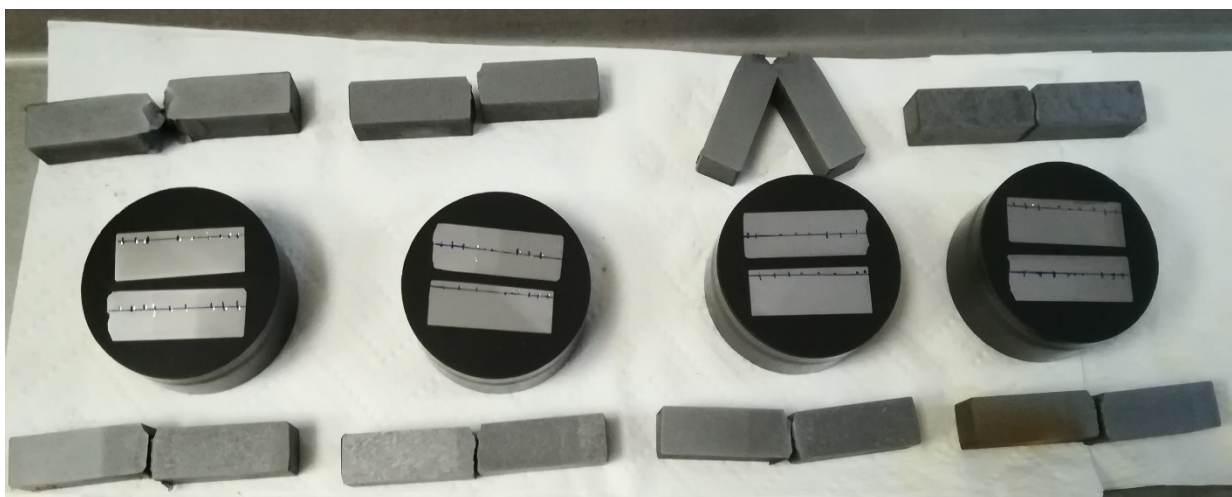
Obrázek 4.7.2 Souhrnný graf zkoušky tvrdosti

4.9 Metalografické šetření

Příprava vzorků

Před samotným vyhodnocováním vzorků musela přijít jejich příprava. Vzorky na zkoumání makrostruktury byly nejdříve vybroušeny na automatické brusce a následně leptány roztokem 10% HNO_3 . Lepání probíhalo pouhým potíráním vatou. Takto připravené vzorky se zkoumaly na mikroskopu ve školní laboratoři.

Při přípravě vzorků pro zkoumání mikrostruktury bylo prováděno další broušení. Než došlo k broušení vzorků, musely být zapečeny do bakelitu. Probíhalo trojí broušení od hrubší po nejjemnější leštadlo o zrnitosti 4 μm . Při leptání se vzorky ponořily do 2% roztoku HNO_3 . Hotové vzorky, kde byla zkoumána mikrostruktura a následně vpichována zkouška tvrdost podle Vickerse, vidíme na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8 Vzorky ke zkoumání mikrostruktury

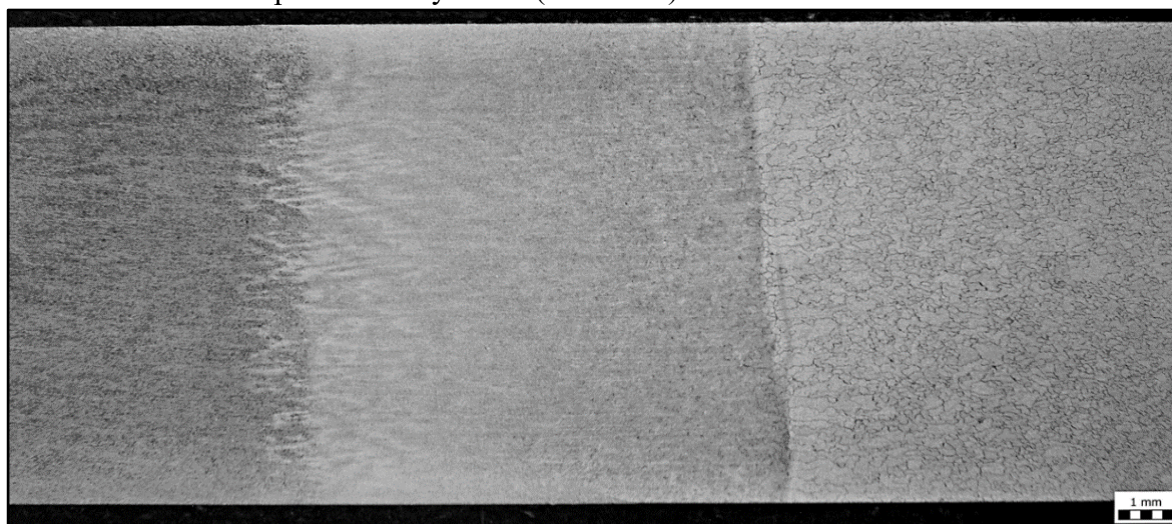
Vyhodnocení vzorků

Zkoumané vzorky jsou náhodně vybrány ze tří vzorků zkoušky rázem v ohybu. Místo zkoušení, ze kterého jsou vzorky vybírány, je oblast svarového kovu. Na těchto vzorkách je nejlépe vidět struktura svaru, pásma TOZ i základní materiál. Vzorky byly zkoumány v příčném výbrusu i v pohledu na svar ze shora (mikrostrukturní pohledy ze shora jsou v příloze). Vyhodnocování makrostruktury probíhalo při zvětšení 10x a vyhodnocení mikrostruktury při zvětšení 200x.

Vzorek A

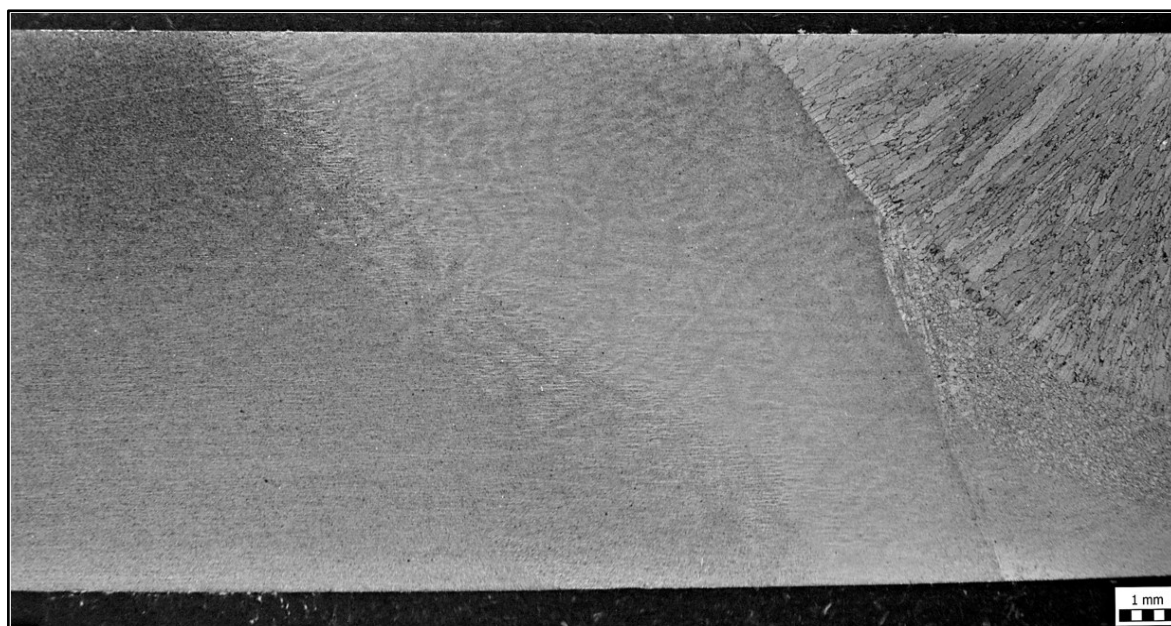
Hodnocení makrostruktury vzorku A bylo provedeno v podélném a příčném řezu. Jsou zde patrné zbytky dendritického uspořádání. Na příčném výbrusu jsou vidět sloupcové krystaly a nejsou patrné žádné vady svarového spoje.

Makrostruktura podélného výbrusu (obr. 4.8.1):



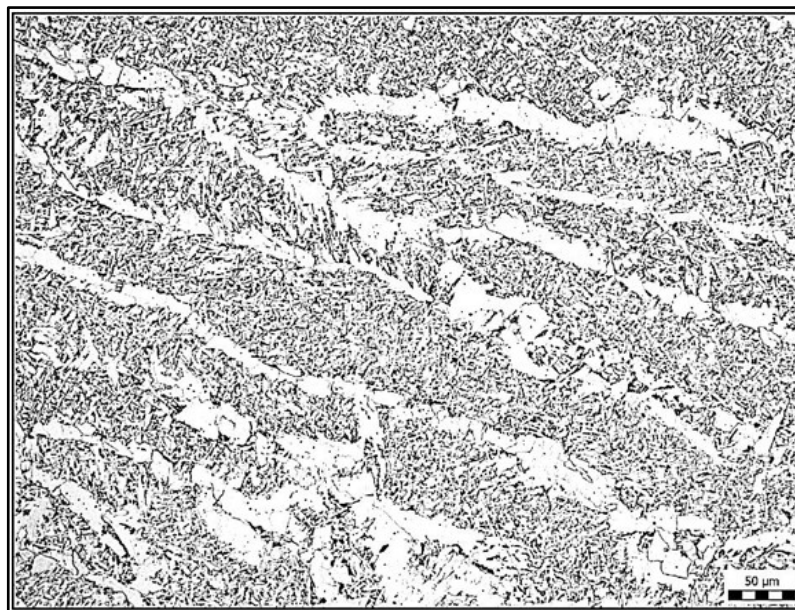
Obrázek 4.8.1 Makrostruktura podélného výbrusu vzorku A

Makrostruktura příčného výbrusu (obr. 4.8.2):



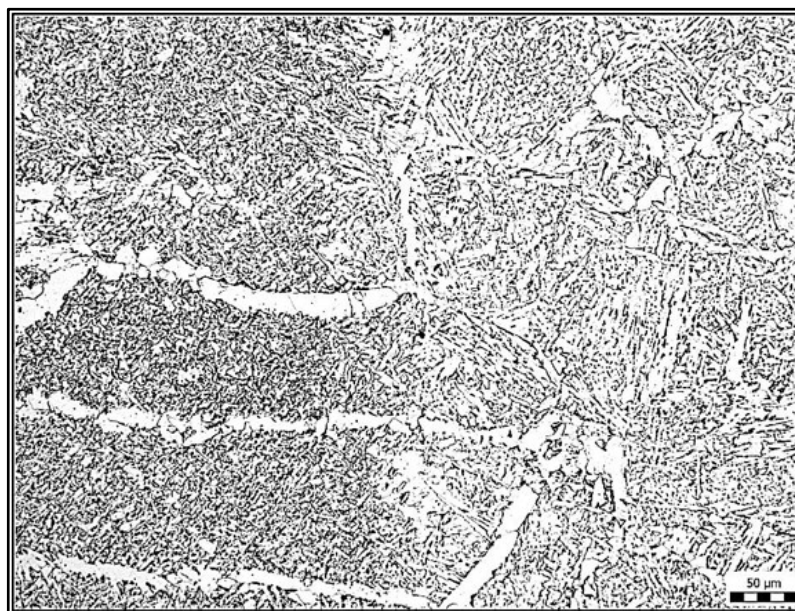
Obrázek 4.8.2 Makrostruktura příčného výbrusu vzorku A

Na obrázku 4.8.3 je mikrostruktura svarového kovu na příčném výbrusu. Je zde vidět lící bainitická struktura s feritickým síťovím.



Obrázek 4.8.3. Mikrostruktura svarového kovu vzorku A

Na obrázku 4.8.4 je mikrostruktura příčného výbrusu v tepelně ovlivněné oblasti. Je zde patrná hrubozrnná struktura tvořená bainitem s ojedinělým výskytem feritu.

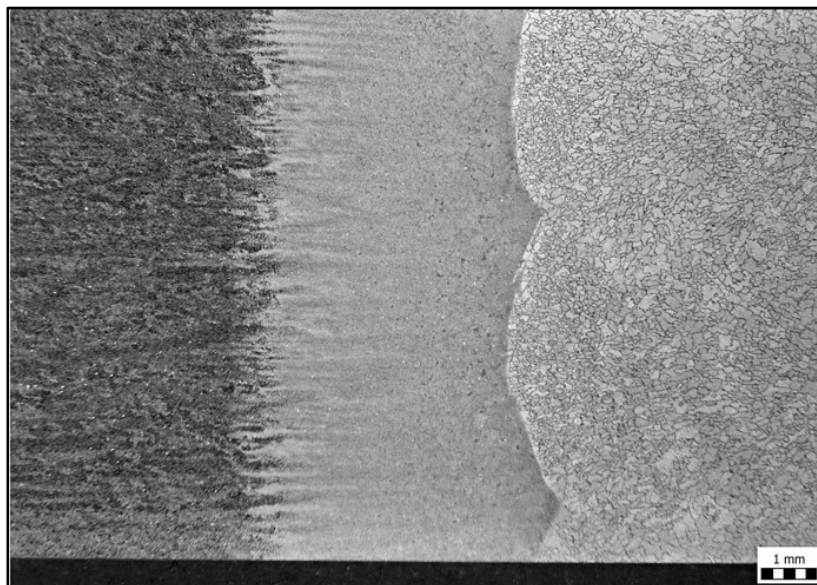


Obrázek 4.8.4 Mikrostruktura v TOZ vzorku A

Vzorek B

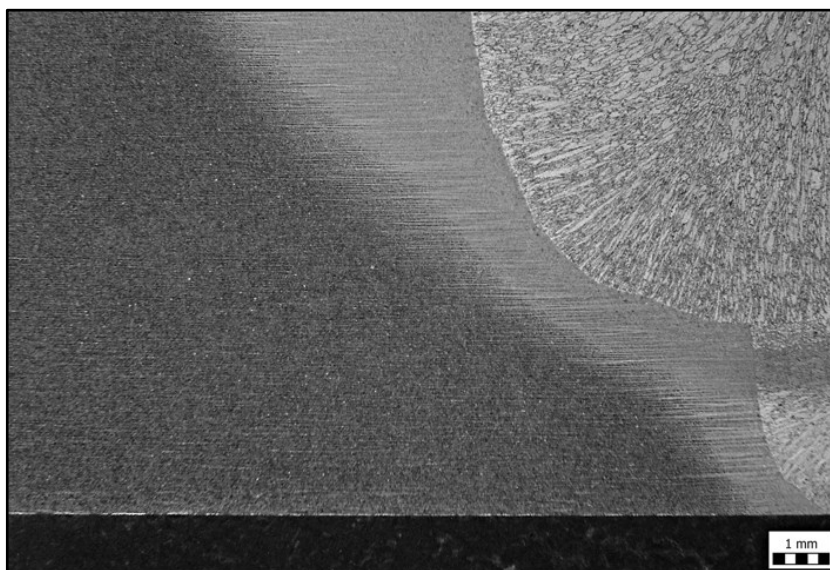
Na obrázku (obr. 4.8.5 a 4.8.6) máme makrostrukturu svaru desky B, který je svařovaný dvěma housenkami. Na podélném výbrusu je vidět obloučkovitost na hranici svarového kovu a TOZ. To je způsobeno technologií svařování. Struktura je rovnoměrná bez známek nějaké vady.

Makrostruktura podélného výbrusu (obr. 4.8.5):



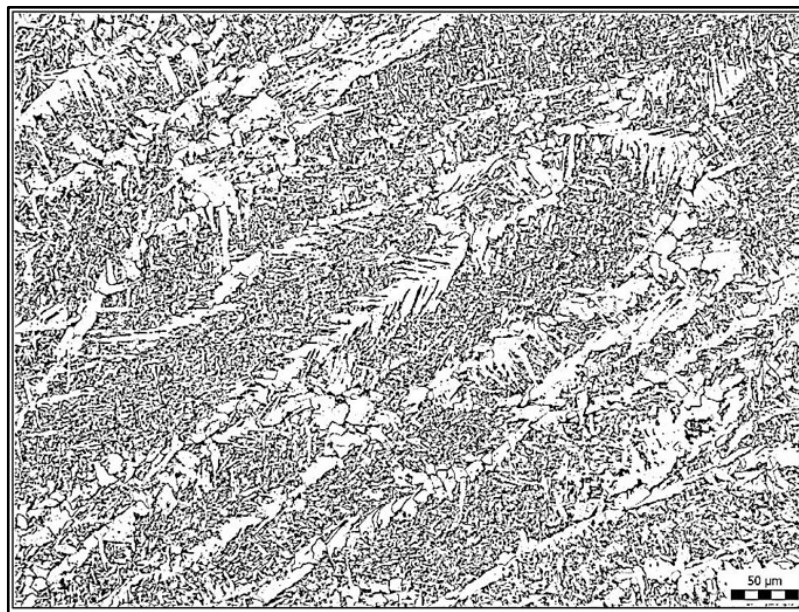
Obrázek 4.8.5 Makrostruktura podélného výbrusu vzorku B

Makrostruktura příčného výbrusu (obr. 4.8.6):



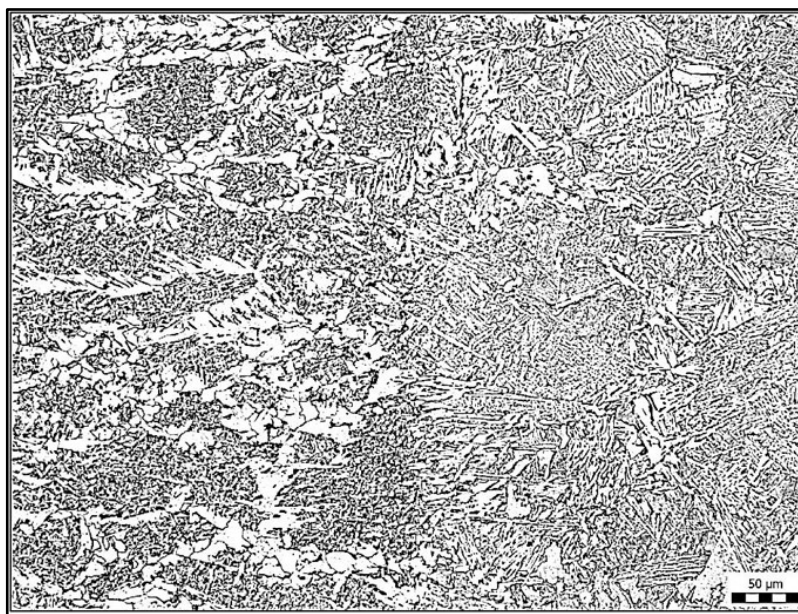
Obrázek 4.8.6 Makrostruktura příčného výbrusu vzorku B

Na obrázku 4.8.7 je mikrostruktura svarového kovu zkušební desky B. Je zde vidět typická lící bainitická struktura s obsahem feritu s výskytem nesouvislého síťoví.



Obrázek 4.8.7 Mikrostruktura svarového kovu vzorku B

Obrázek 4.8.8 znázorňuje mikrostrukturu příčného výbrusu v TOZ. Je zde patrná bainitická struktura s ojedinělým výskytem feritu, výskyt feritu do 2%.

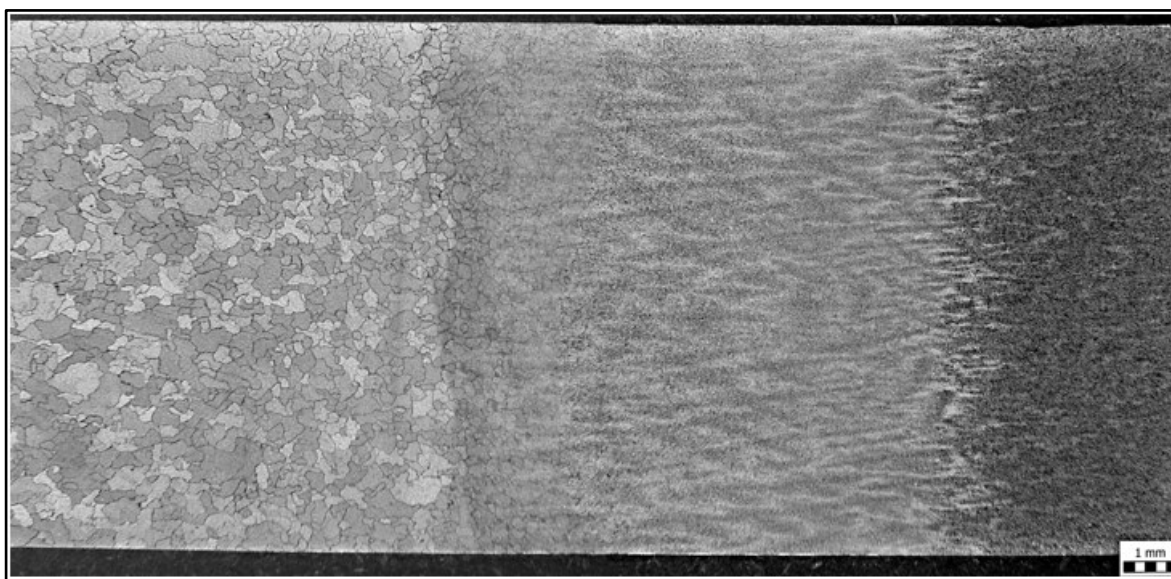


Obrázek 4.8.8 Mikrostruktura v TOZ vzorku B

Vzorek C

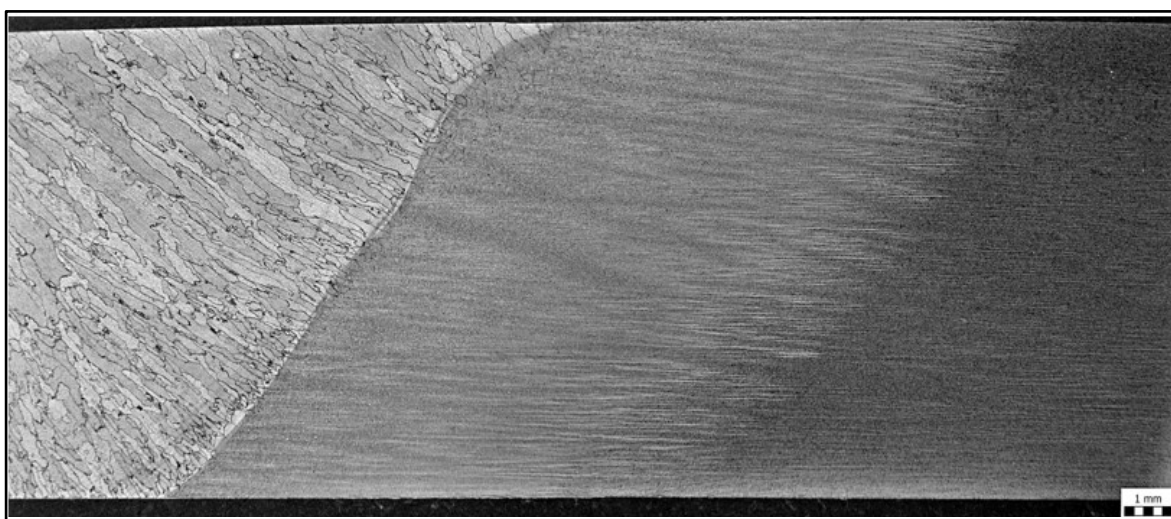
Na obrázcích makrostruktury vzorku C (obr. 4.8.9 a 4.8.10) vidíme strukturu svaru, která je svařovaná jednou housenkou. Máme zde zbytky dendritického uspořádání a na příčném výbrusu sloupcovité krystaly licího svarového kovu s přechodem do hrubozrnné struktury.

Makrostruktura podélného výbrusu (obr. 4.8.9):



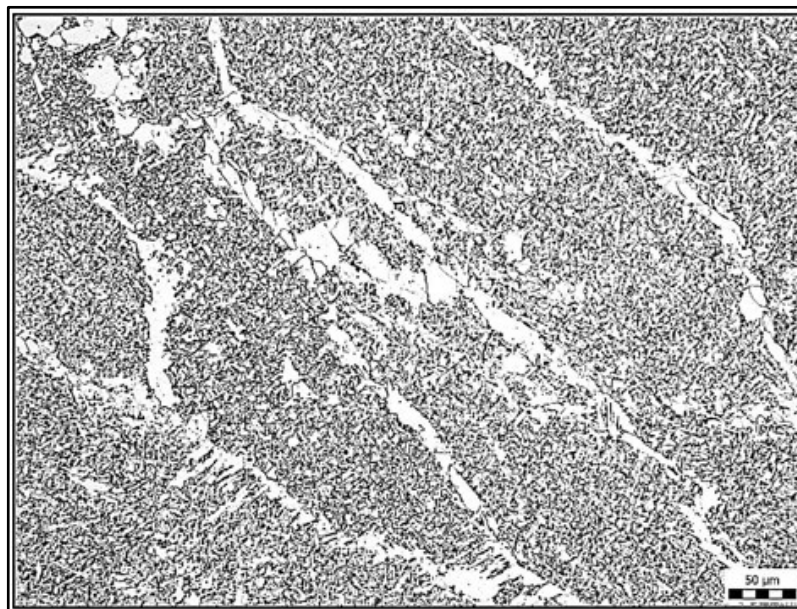
Obrázek 4.8.9 Makrostruktura podélného výbrusu vzorku C

Makrostruktura příčného výbrusu (obr. 4.8.10):



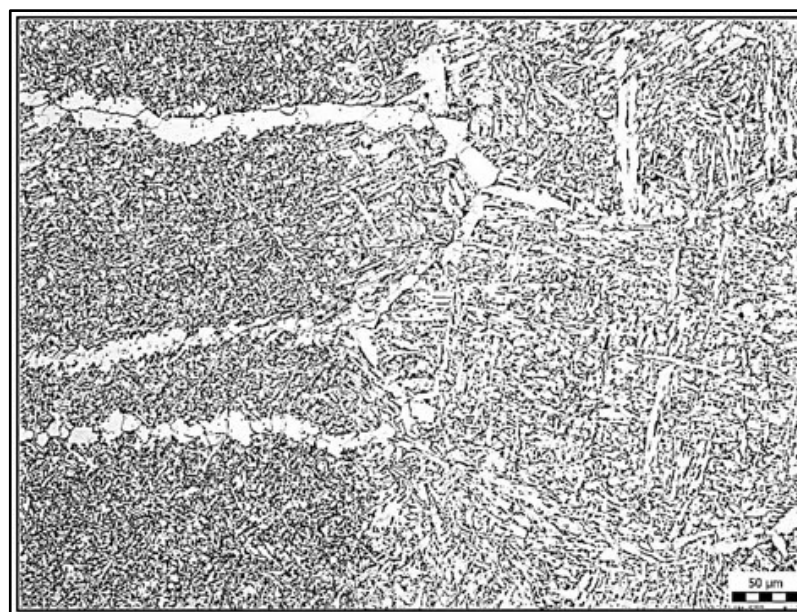
Obrázek 4.8.10 Makrostruktura příčného výbrusu vzorku C

Na obrázku mikrostruktury (obr. 4.8.11) příčného výbrusu svarového kovu máme ličí bainitickou strukturu s feritickým síťoví.



Obrázek 4.8.11 Mikrostruktura svarového kovu vzorku C

Mikrostruktura příčného výbrusu v TOZ je znázorněna na obrázku 4.8.12. Vidíme zde hrubozrnnou bainitickou strukturu s ojedinělým výskytem feritu.

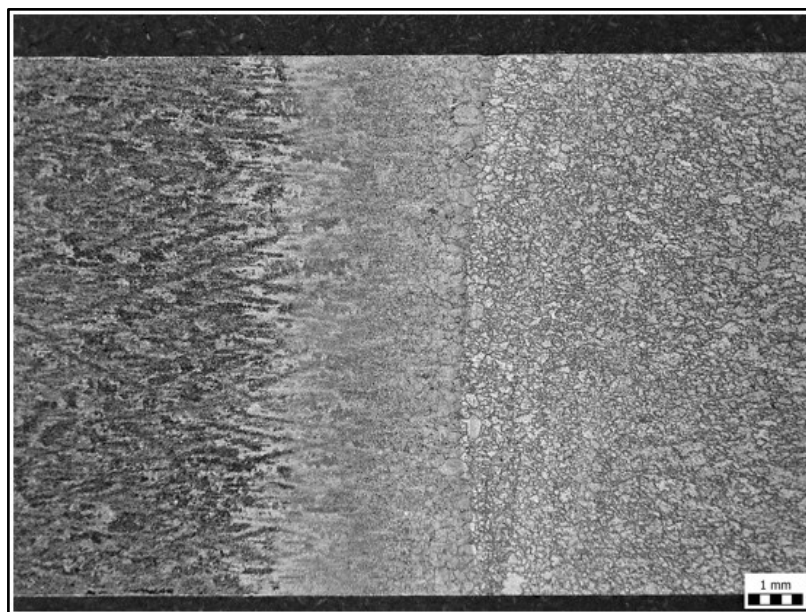


Obrázek 4.8.12 Mikrostruktura v TOZ vzorku C

Vzorek D

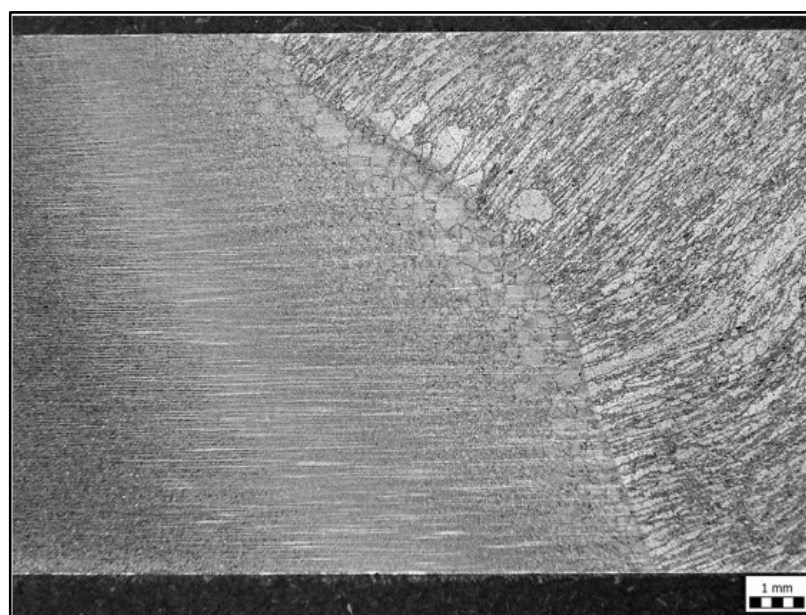
Makrostruktury zkušebního svaru vzorku D vidíme na obrázcích 4.8.13 a 4.8.14. Máme zde strukturu svaru, který je svařovaný jednou housenkou. Na podélném i příčném výbrusu je vidět rovnoměrná struktura bez náznaku nějaké vady ve svarovém spoji.

Makrostruktura podélného výbrusu (obr. 4.8.13):



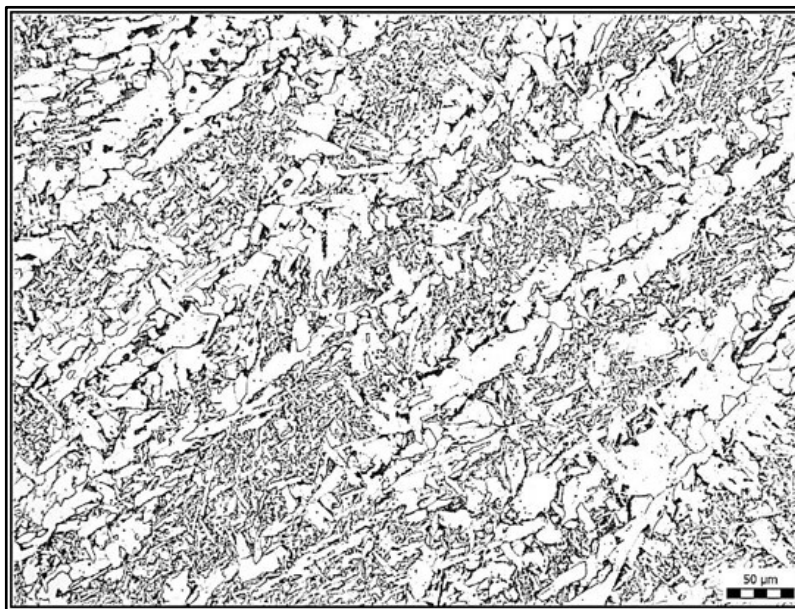
Obrázek 4.8.13 Makrostruktura podélného výbrusu vzorku D

Makrostruktura příčného výbrusu (obr. 4.8.14):



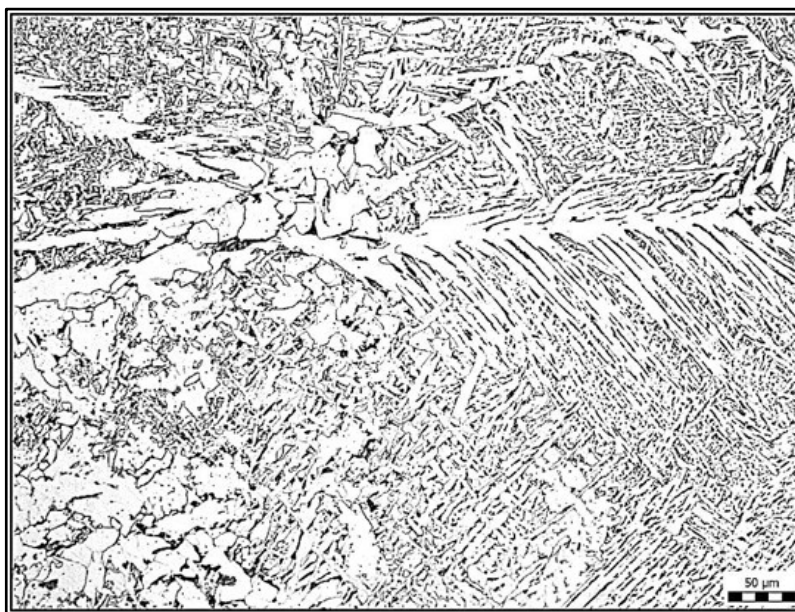
Obrázek 4.8.14 Makrostruktura příčného výbrusu vzorku D

Na obrázku 4.8.15 je mikrostruktura svarového desky D v příčném výbrusu. Je zde patrná lící struktura tvořená bainitem s výskytem nesouvislého síťoví tvořené feritem a perlitem.



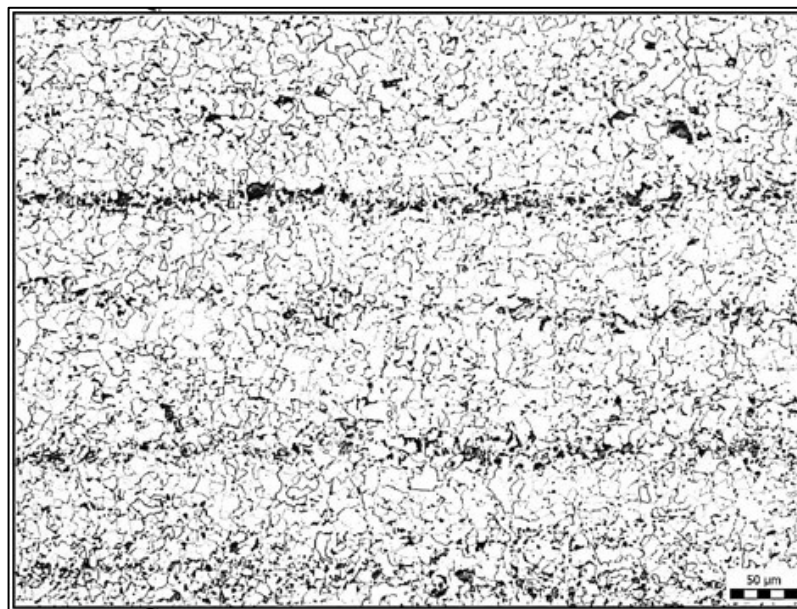
Obrázek 4.8.15 Mikrostruktura svarového kovu vzorku D

Mikrostruktura příčného výbrusu v oblasti TOZ zkušební desky D je znázorněna na obrázku 4.8.16. Je zde bainitická struktura s ojedinělým výskytem feritu.

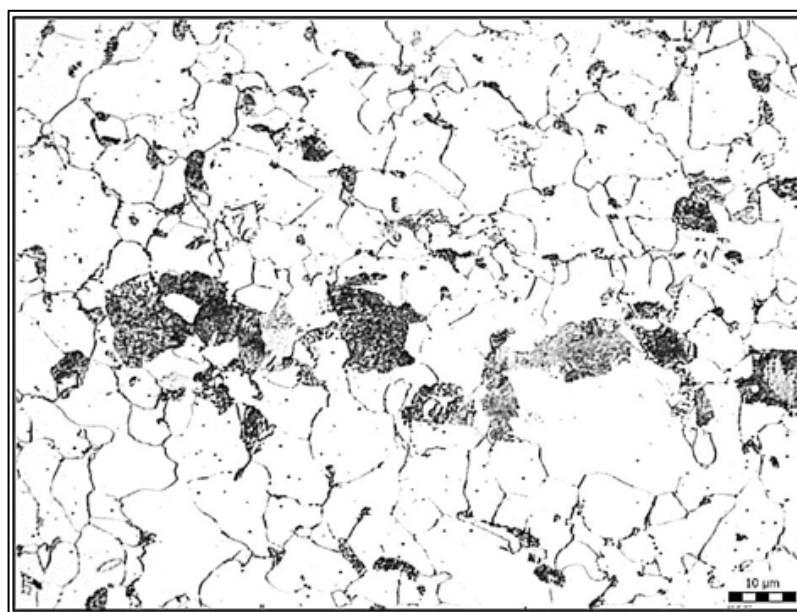


Obrázek 4.8.16 Mikrostruktura v TOZ vzorku D

Struktura základního materiálu (obr. 4.8.17) u vzorku A a C jsou totožné. Máme zde rovnoměrnou, řádkovou, feriticko-perlitickou strukturu s výskytem rozpuštěných karbidů uvnitř feritických zrn.

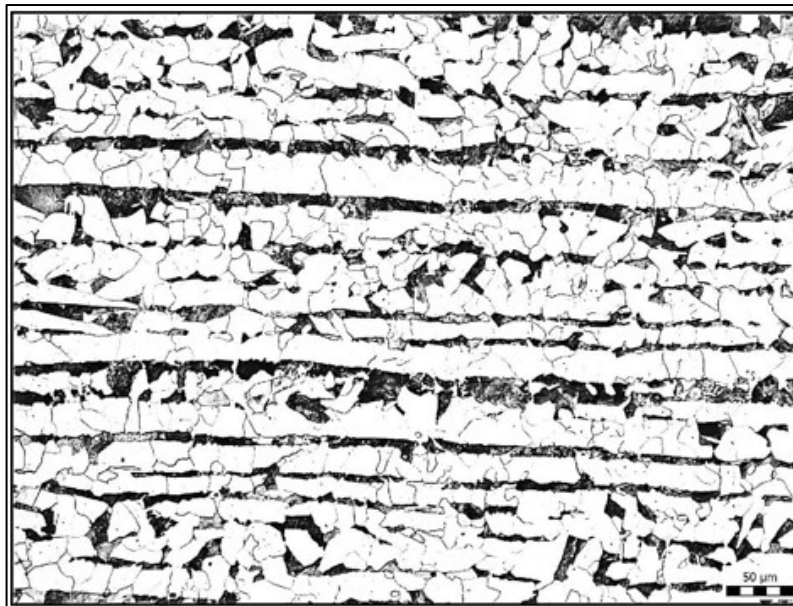


Obrázek 4.8.17a Mikrostruktura základního materiálu

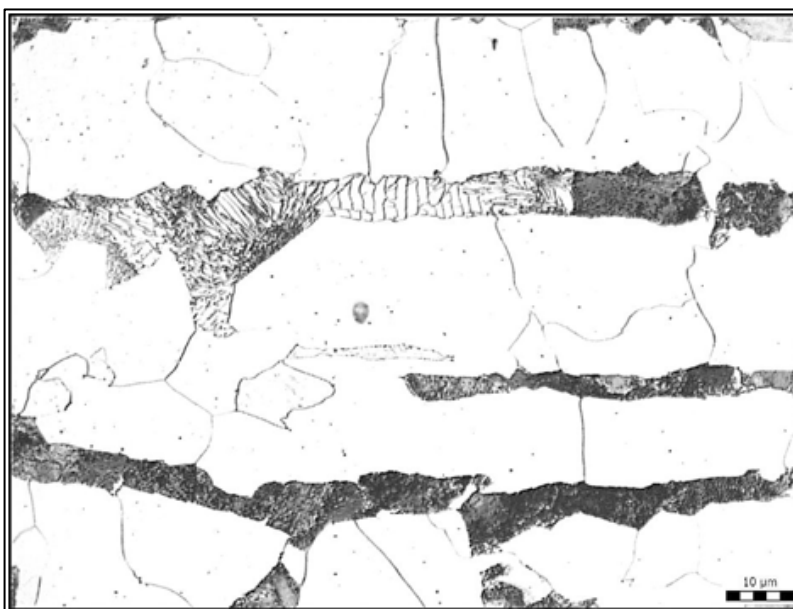


Obrázek 4.8.17b Mikrostruktura základního materiálu

Struktura vzorků B a D z desek 25mm (obr. 4.8.18) má řádkovitou strukturu, která je tvořena polyedritickými zrny feritu a nodulemi perlitu.



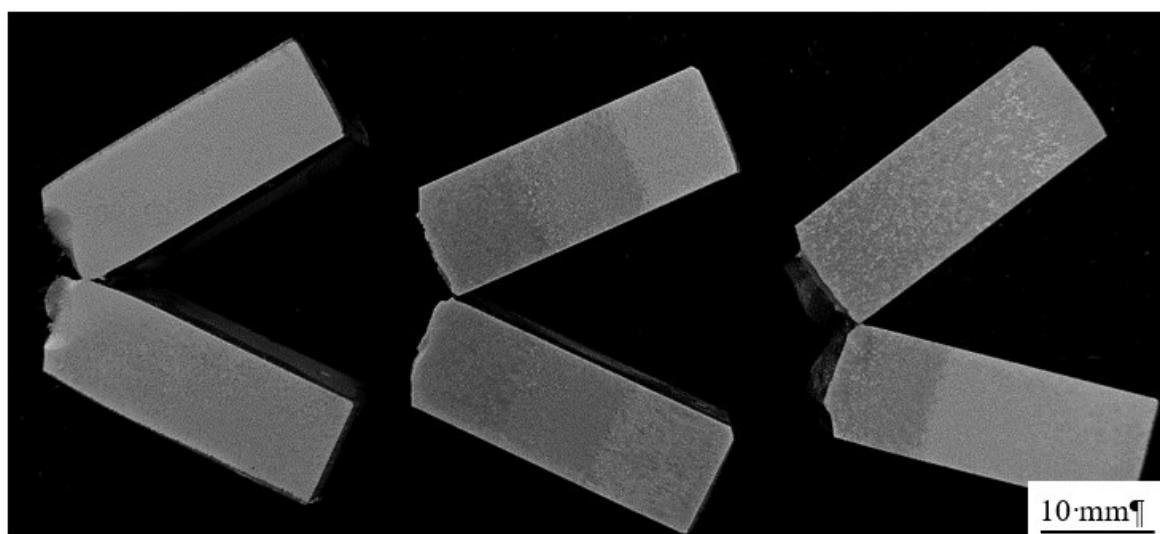
Obrázek 4.8.18a Mikrostruktura základního materiálu



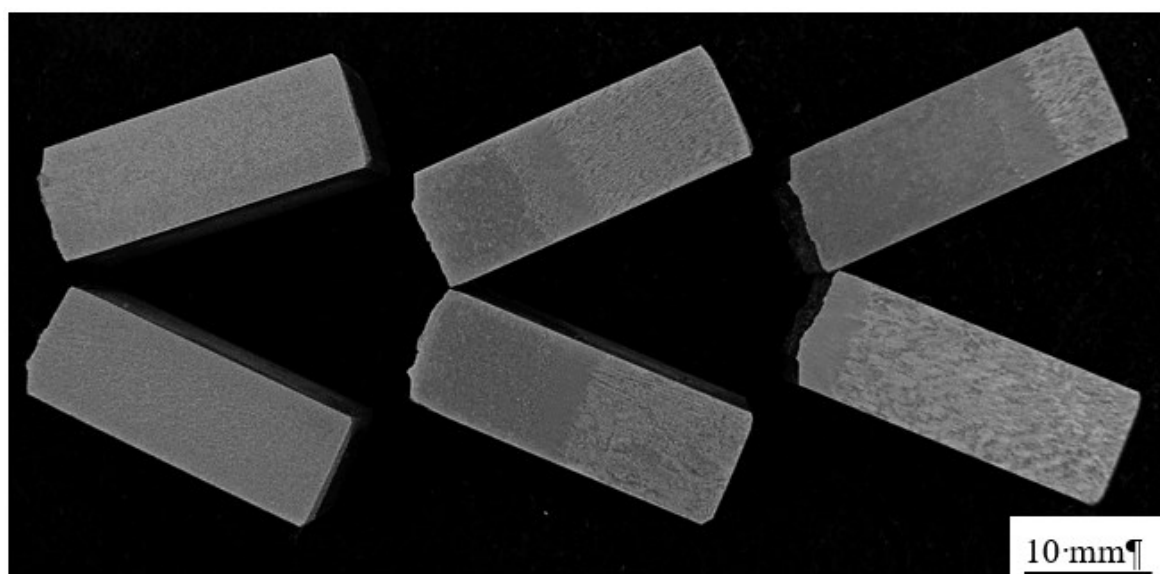
Obrázek 4.8.18b Mikrostruktura základního materiálu,

Šířka pásma tepelného ovlivnění

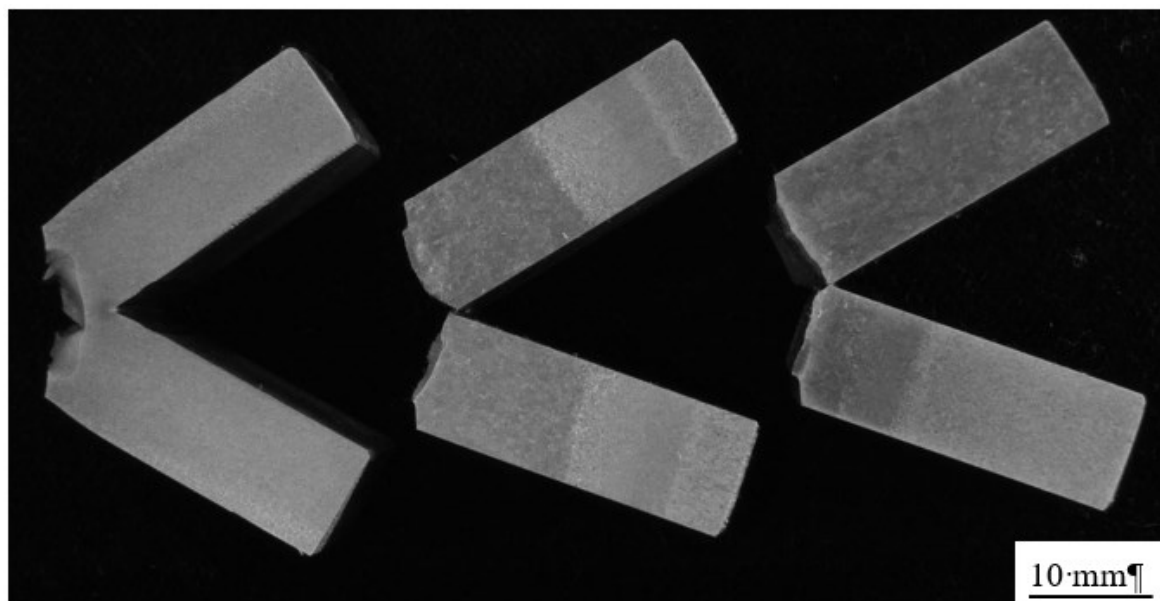
Při zkoumání vzorků na makrostrukturu bylo provedeno také vyhodnocení šířky pásma tepelného ovlivnění. Na obrázku 4.8.19a máme oblast teplotního ovlivnění zkušebního svorového spoje vzorku A. Hodnota ovlivnění dosahuje 9 mm. Na obrázku 4.8.19b je ovlivnění vzorku B do vzdálenosti 5 mm. Na obrázku 4.8.19c vidíme ovlivnění vzorku C do vzdálenosti 10,5 mm a na obrázku 4.8.19d je hodnota ovlivnění vzorku D do vzdálenosti 4,5 mm.



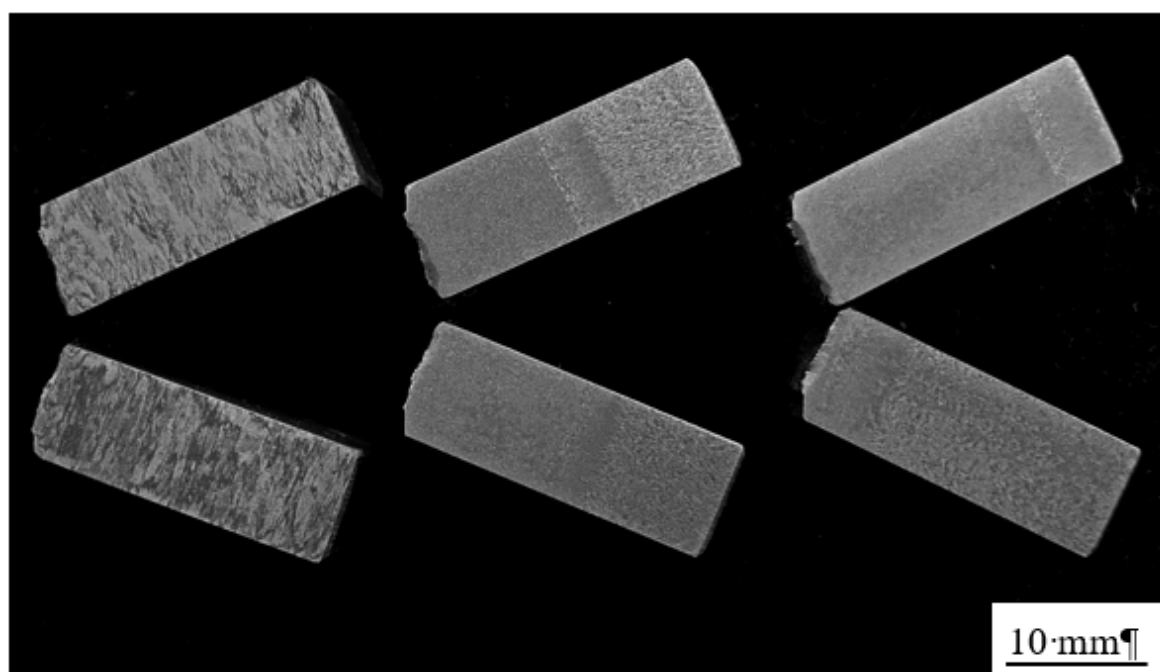
Obrázek 4.8.19a Vyhodnocování šířky tepelného ovlivnění vzorku A



Obrázek 4.8.19b Vyhodnocování šířky tepelného ovlivnění vzorku B



Obrázek 4.8.19c Vyhodnocování šířky tepelného ovlivnění vzorku C



Obrázek 4.8.19d Vyhodnocování šířky tepelného ovlivnění vzorku D

4.10 Shrnutí výsledků

Porovnáme-li zkušební svarové spoje desek A a C o tloušťkách 40 mm, tak lepších výsledků mechanických zkoušek se docílilo u desky A, která byla svařovaná dvěma housenkami. Kořenová pomocí DC+ a krycí pomocí střídavého proudu AC. Struktury u obou zkušebních svarových spojů byly podobné a to jak v oblasti svarového kovu, tak i v TOZ. Při hodnocení mikrostruktury byla struktura svarového kovu licí bainitická se síťovým feritu a v oblasti TOZ byla struktura hrubozrnná, bainitická s občasným výskytem feritu. Při hodnocení makrostruktury svarového spoje byla u desky A zjištěna šířka pásma tepelného ovlivnění 9 mm a u desky C 10,5 mm. To odpovídá i výpočtu vneseného tepla, kdy hodnota vneseného tepla u desky C je přibližně dvojnásobná než je tomu u desky A. Při aplikaci nových svařovacích parametrů do výroby musíme brát v úvahu, že se jedná o svařování dvěma housenkami, tudíž zde bude komplikovanější výroba a navíc nutnost dalšího odstranění strusky před svařováním druhé housenky.

Při porovnání svarových zkušebních spojů desek B a D o tloušťkách 25 mm se docílilo lepších mechanických vlastností svarového spoje u desky B, která byla svařovaná metodou MAG a dvěma housenkami. Při hodnocení mikrostruktury bylo zjištěno, že deska D má oproti desce B v oblasti svarového kovu licí bainitickou strukturu se síťovým feritu a perlitu, přičemž deska B má licí bainitickou strukturu se síťovým feritu, ale bez perlitu. To se promítlo na zkoušce tvrdosti, kde hodnoty vpichů v této oblasti u desky D byly výrazně nižší než u desky B. V oblasti TOZ u desky D máme strukturu bainitickou s výskytem feritu vyšším než u desky B, kde v této oblasti je struktura bainitická s velmi ojedinělým výskytem feritu, do 2%. Tím se toto místo stává křehčím a výsledné mechanické zkoušky v této oblasti vyšly hůře. Při porovnání šířky pásma tepelného ovlivnění bylo docíleno nepatrně užšího pásma u desky D, kde se blíží hodnotě 4,5 mm oproti desce B, která má šířku pásma tepelného ovlivnění 5 mm.

5 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce se řešilo svařování zkušebních svarových spojů, které odpovídají výrobě válcových běhounů firmy Ammann. Úkolem bylo zjistit, zda lze změnou nových parametrů svařování docílit efektivnější výroby nebo zlepšit kvalitu svarového spoje. Svařování probíhalo ve výrobních prostorech firmy Ammann, mechanické zkoušky byly provedeny v laboratořích firmy ESAB a metalografické vyhodnocení ve školních laboratořích. Svařovaly se dvě desky o tloušťce 40 mm a dvě o tloušťce o 25 mm. U desek o tloušťce 40 mm, které byly svařovány automatem pod tavidlem, šlo o porovnání kvality zkušebního svarového spoje při změně svařovacích parametrů a u desek o tloušťce 25 mm šlo o porovnání kvality svarového spoje při změně metody svařování, přičemž obě tyto metody firma aplikuje při výrobě. Jde o svařování běhounů do tloušťky plechu 25 mm metodou MAG a automatem pod tavidlem. Výsledky šetření zkušebních svarových spojů nám ukázaly, že nové svařovací parametry zlepší mechanické vlastnosti svarového spoje. Je ale zapotřebí brát v úvahu, že aplikace nových svařovacích parametrů se může podepsat do výrobního procesu a doby výroby válcového běhounu. Je taky možné, že tyto změny ve výrobě by sebou nesly i značný zásah ve strojním uspořádání výrobní haly.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. National Tube Company. *Method of welding*. Původci vynálezu: Boris S ROBINOFF, Sumner E PAINE, Wrignol E QUILLEN. USA, United States Patent Office. Patentový spis 1782316. 1930-11-18.
2. KOSTKA, Petr. *Přehled technologií svařování*. Ostrava VŠB-TU, 2007/2008 [cit. 2019-05-09]
3. KUBÍČEK, Jaroslav, DANĚK, KANDUS. *Technologie svařování a zařízení: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Plzeň, 2011. [cit. 2019-05-09]
4. *Příručka pro svařování pod tavidlem: Technická příručka*. b.m.: ESAB Vamberk, 2009. 96 s. reg. č. XA00136020.[cit. 2019-04-28]
5. Ammann Group. *ARX 90 TIER3* [Tandemový válec] [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.ammann.com/cz-cz/machines/soil-and-asphalt-compactors/tandem-rollers/arx-90-tier-3>
6. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN isbn80-214-2683-7.
7. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II: Část svařování [online]*. Technická 2896/2, 616 69 BRNO, 2006 [cit. 2019-04-29]. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
8. *Svařování oceli* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.chatar-chalupar.cz/svarovani-oceli/>
9. KULHÁNEK, Karel. *Svářečská škola pro veřejnost: Výukový vzdělávací modul svařování elektrickým obloukem* [online]. Neratovice [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: http://sosasou-opvk.cz/3doc/vys/Vyukovy_vzdelavaci_modul_svarovani_elektricky_oblounk.pdf. Střední odborná škola a odborné učiliště Neratovice.
10. KOLARÍK, Ladislav. *Svařování metodou MIG/MAG: Moderní modifikace metody MIG/MAG*[online]. Technická 4, 166 07 Praha 6 [cit. 2019-05-09]. Prezentace. ČVUT-Fakulta strojní.

11. KOPŘIVA, Ing. Jaroslav. *Plyny pro svařování: Linde gas* [online]. Praha, 2010 [cit. 2019-05-09]. Prezentace.
12. *Svarinfo: Magazín praktického svařování* [online]. Praha, 2006 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008011702>
13. KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařování metodou MIG/MAG: Inovace předmětu Svařování, pájení a lepení* [online]. Technická 4, 166 07 Praha 6 [cit. 2019-05-11]. Prezentace. ČVUT.
14. S355: *Mechanické vlastnosti konstrukčních ocelí* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/trubky1-S355J2H.pdf>
15. *Výrobky válcované za tepla z nelegovaných konstrukčních ocelí podle normy technických dodacích předpisů (TDP) ČSN EN 10025* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP_TDP%20a%20uzivatel_koment_10025-2.pdf
16. *Základy tepelného zpracování kovů* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
17. PIEKARSKA, W., M. KUBIAK a A. BOKOTA. *Numerical simulation of thermal phenomena and phase transformations in laser-arc hybrid welded joints* [online]. 10.1.2011, , 13 [cit. 2019-05-01].
18. *KATALOG PŘÍDAVNÝCH SVAŘOVACÍCH MATERIÁLŮ: Technická příručka. b.m.: ESAB Vamberk, 29.2.2012. 665 s. reg. č. XA00156614*
19. *Kuhlmeyer UKF* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://kuhlmeyer.de/en/news/edge-bevelling-with-the-kuhlmeyer-ukf.html>
20. *Statické elektromechanické zkušební stroje: Řada E* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.labortech.cz/produkty/zkusebni-systemy/staticke-elektromechanicke-zkusebni-stroje/>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1. - Šířky pásma tepelně ovlivněné oblasti. Vzorky ze zkušebních svarových spojů desek A a B

Příloha č. 2. - Šířky pásma tepelně ovlivněné oblasti. Vzorky ze zkušebních svarových spojů desek C a D

Příloha č. 3 – Mikrostruktura podélného výbrusu vzorku A

Příloha č. 4 – Mikrostruktura podélného výbrusu vzorku B

Příloha č. 5 – Mikrostruktura podélného výbrusu vzorku C

Příloha č. 6 – Mikrostruktura podélného výbrusu vzorku D